

建築空間における木材の火災拡大性状制御
から見た木材の改質・構成の研究

Fire Safety Performance of Wooden Assemblies
in Built Environments
from Material and Construction Aspects

2020 年 2 月

早稲田大学大学院 創造理工学研究科
建築学専攻 建築防災研究

高瀬 棕
Ryo TAKASE

目 次

第1章 序 論

1.1	はじめに	1-2
1.2	木質仕上げ・木現しの実例	1-3
1.2.1	内装制限の範囲内での木質化	1-3
1.2.2	避難安全性検証による内装制限の適用除外.....	1-4
1.2.3	耐火性能検証法による木構造部材の現し	1-4
1.3	木質仕上げの技術的展望.....	1-5
1.4	難燃化による燃焼制御	1-7
1.4.1	難燃処理木材とは.....	1-7
1.4.2	難燃処理木材の現状の課題	1-7
1.4.3	優良木質建材等認証 (AQ)	1-8
1.5	空間設計・部材配置による燃焼制御.....	1-8
1.5.1	平坦な壁面上の火炎伝播に関する既往研究.....	1-8
1.5.2	建築の部位・形状の影響.....	1-9

第2章 蛍光 X 線分析による難燃処理木材内の薬剤分布の計測法

2.1	目的と背景.....	2-3
2.2	研究方法	2-5
2.3	分析装置の概要および精度の考え方.....	2-5
2.4	蛍光 X 線分析の精度に関する検証	2-7
2.4.1	実験装置	2-7
2.4.2	分析条件	2-8
2.4.3	試験片	2-8
2.4.4	溶脱法による薬剤量計測.....	2-10
2.4.5	結果と考察.....	2-14
2.5	カラーマッピング画像の解像度の検討.....	2-21
2.5.1	実験方法	2-21
2.5.2	結果と考察.....	2-21
2.6	計測条件ごとのマッピング出力値と薬剤量の関係の検討.....	2-24
2.6.1	実験方法	2-24
2.6.2	結果と考察.....	2-25
2.7	まとめ	2-28

第3章 難燃処理木材の板厚方向の薬剤分布と火災安全性

3.1	目的.....	3-3
3.2	燃焼発熱性に対する薬剤分布の影響.....	3-3
3.2.1	実験方法	3-3
3.2.2	実験結果	3-7
3.2.3	考察.....	3-12
3.3	模型箱試験による燃え広がりの評価.....	3-16
3.3.1	目的.....	3-16
3.3.2	実験方法	3-16
3.3.3	結果.....	3-27
3.3.4	考察.....	3-36
3.3.5	まとめ	3-41

第4章 壁面ルーバーの燃焼性状および防火的措置

4.1	目的および概要	4-3
4.1.1	目的.....	4-3
4.1.2	概要.....	4-4
4.2	ルーバーの燃焼拡大性状の基礎的把握.....	4-5
4.2.1	実験および解析の位置づけ	4-5
4.2.2	実験.....	4-6
4.2.3	分析方法	4-13
4.2.4	実験結果	4-18
4.2.5	考察.....	4-22
4.3	実大・幅方向縮小実験（実験Ⅱ・Ⅲ）	4-29
4.3.1	実験方法	4-29
4.3.2	試験体.....	4-32
4.3.3	加熱条件の検討	4-38
4.3.4	実験結果と考察	4-45
4.4	まとめ	4-64

第5章 総括

資料編

第 1 章 序論

1.1	はじめに.....	1-2
1.2	木質仕上げ・木現しの実例	1-3
1.2.1	内装制限の範囲内での木質化.....	1-3
1.2.2	避難安全性検証による内装制限の適用除外.....	1-4
1.2.3	耐火性能検証法による木構造部材の現し	1-4
1.3	木質仕上げの技術的展望.....	1-5
1.4	難燃化による燃焼制御.....	1-7
1.4.1	難燃処理木材とは	1-7
1.4.2	難燃処理木材の現状の課題	1-7
1.4.3	優良木質建材等認証 (AQ).....	1-8
1.5	空間設計・部材配置による燃焼制御.....	1-8
1.5.1	平坦な壁面上の火炎伝播に関する既往研究.....	1-8
1.5.2	建築の部位・形状の影響.....	1-9

1.1 はじめに

昨今の木造・木質防火を取り巻く要請において特異な点の 1 つに、ごく一般的な規模の室内で見付面積の大きな木造部材のあらかしや、木質仕上げが希求されていることが挙げられる。このニーズは、中層木造を耐火被覆なしで建築可能とする法整備の 1 つの動機ともなっている¹。他方、木材のテクスチャを精細に印刷したシート状の仕上げ材等も流通しており、人の往来が多い百貨店等の仕上げ材料として見かけることがある。本物の木材がフィルム材料と異なるのはどのような点だろうか。

中大規模木造推進のためのアンケート調査²で得られた設計者、施工者からの回答によれば、木造建築を計画して良かった点、或いは施主や使用者に喜ばれた点として、ぬくもり、落ち着きに関する回答が圧倒的に多かったと報告している。これは国内に限らず、たとえばカナダで行われた主観評価に関する研究³によれば、温かい、快適、リラックスする、ナチュラルな、といった評価を受けていることが明らかにされている。こうした主観評価には、木材の持つ光の微細な反射特性あるいは熱的特性⁴も無関係ではないと考えられる。

また、近年では、こういった木の良さを主観評価のみならず、生体活動の指標（血圧、脳血流量の変化など）から明らかにする試みもある。恒次らは木材率が 0, 45（床＋腰壁）, 90%（床・天井全面＋壁面下方）の 3 通りの部屋を用いて被験者実験を行い、快不快などの主観評価、脈拍、血圧を計測した⁵。検討された中では木材率 45%の部屋が最も快適との主観評価が得られ、血圧低下を補うようにして脈拍の上昇が見られたのに対して、木材率 90%の部屋では、はじめのうちは血圧の上昇が見られ、その後速やかに大脳活動の低下と脈拍の増加が認められたことが明らかにされ、大脳活動の低下は被験者の飽きであるとの考察がなされている。

使用者の「飽き」という視点を加えると、建築内外装に敢えて加工度を上げてまで格子（Fig. 1.1-1）やルーバーなどの複雑な架構が少なからず採用されてきた背景には、勿論、日射の遮蔽など実用上の理由もあるだろうが、設計者のみならず、使用者もそれらを「飽きない木質仕上げ」として好ましいと受容していることを垣間見ることが出来、無垢の木材特有の良さ、あるいはその活かし方について、客観的指標からも明らかにされつつあると言える。

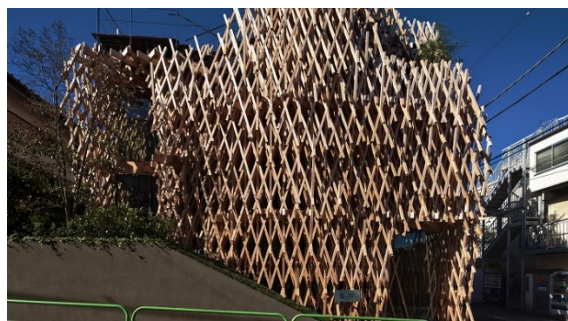


Fig. 1.1-1 A shop façade composed of wooden lattice
(photo is retrieved from <https://www.sunnyhills.com.tw/store/ja-jp/>)

1.2 木質仕上げ・木現しの事例

1.2.1 内装制限の範囲内での木質化

内装制限の対象となる室において、特段の避難時間の検証を行う場合を除いては、仕上げ材自体に難燃処理を施すなどして国土交通省大臣認定の準不燃木材、不燃木材といった材料に適合させることを求められる。Fig. 1.2-1 に旭川駅の例を示す。ここでは、タモ材を難燃処理して準不燃材料としたものが使用されている⁶。

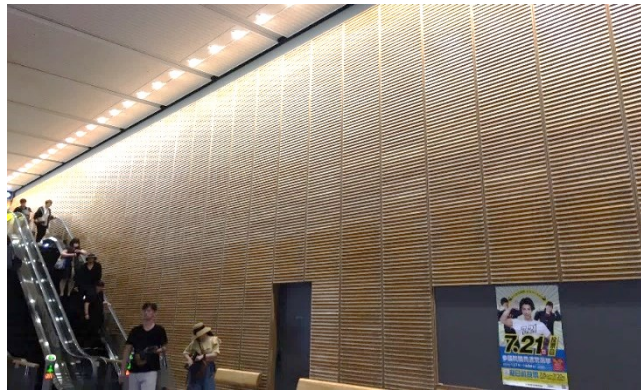


Fig. 1.2-1 Wooden finished concourse at Asahikawa Sta. (photo was taken by the author)

また、無処理木材を使用する方策としては、壁・天井面の見付面積 1/10 以内に限り、不燃化の対象範囲から除外するという内装制限の運用内規に従った木質化や、建築部位と見なされない建具等の木質化が挙げられる。前者の例としては高知県自治会館(Fig. 1.2-2)が挙げられ、文献⁷によれば、スギ材を天井見付面積の 1/10 以内となるよう採用したとの記述がある。後者の例としては宮崎県の小林市庁舎が挙げられ、アトリウムに面する 1 階の木製格子には無処理木材が用いられている。



Fig. 1.2-2 Kochi city government office

(photo is retrieved from <http://www.sakawa.net/blog/201609/556>)

1.2.2 避難安全性検証による内装制限の適用除外

鉛直壁面において無処理の木架構を実現するために採用された例には大阪木材仲買会館（Fig. 1.2-3）が挙げられ、写真中の格子壁を実現するために、格子壁のモックアップ実験と避難安全検証法を組み合わせた検証を行い、煙降下より在館者の避難が先に終了することを確認している⁸。



Fig. 1.2-3 An atrium in Osaka Mokuzai Nakagai hall (photo was taken by the author)

1.2.3 耐火性能検証法による木構造部材の現し

空間の気積および天井の高さを活かして、天井付近に現し使用した木質部材が火災時に着火しないこと、或いは着火しても燃え止まることを検証して木現しとする方法である。高知駅(Fig. 1.2-4)、木材会館、秋田拠点センターALVE などが挙げられる⁹。



Fig. 1.2-4 Kochi station (photo was taken by the author)

1.3 木質仕上げの技術的展望

木材は可燃性材料であるのと同時に、熱の散逸しやすい部位では燃焼が続きにくい性質を持ち合わせていることが明らかにされており、例えば木板によって仕上げた鉛直壁面は、外部からの熱取得がなければ、火源火炎高さとはほぼ一定の比率で燃え止まること¹⁰、反対に、室の爆発的な火災に至るまでの時間を遅延させる上で、天井を不燃化する効果が高いことが示されてきた^{11, 12}。また、昨今では木質系を含む材料で仕上げた室における区画の熱損失条件と、火災の爆発的な拡大に至るまでの時間の関係についても、実大実験により検証され始めている¹³。

このように、個々の建築部位における火災時の熱的環境に応じて木材の燃焼性の組み合わせを考慮するという考え方に立脚して、居室規模の壁や天井といった部位の使い分けに関する知見の整備は進められている。一方で、鉛直壁面への使用を前提としたときに、どのような使い方まで許容できるかは、溝を切った木材の燃焼発熱性などが一部明らかにされていること¹⁴を除くと参照できるデータに乏しい。とりわけ、ルーバーや Fig. 1.1-1 に示したような木製の立体架構は意匠的な新規性や環境建築への志向によって多見されるようになってきていることから、それらの火災安全性が確保できる条件についても、ある程度パターン化して用意していく必要があると考えられる。

上記とは反対に、一般的な天井高の居室の天井仕上げ等は無処理木材で仕上げると火災危険を増すことから、依然こうした用途に対しては材料自体の燃焼性を抑制（難燃処理）する必要がある。1.4.1 節で述べるように、想定通りの薬剤処理を行うことが出来れば、木材の発炎燃焼を有効に抑制出来るため、様々な物件で多用されている。しかしながら、薬剤の固形分が期待した通りに含浸されない、或いは経年によって薬剤が材表に浮き出す（：白華）といった問題があり、防火性能のばらつきや経年変化が懸念されている。また、難燃薬剤の注入性は樹種によって大きく異なり、意匠上の選択肢を増やすことの障壁となっている。難燃処理木材については、性能担保に関する懸念を検証して、既存建築物に使用されている材料の信頼性や、今後の品質管理の手法を検討しておく必要が考えられる。本研究では Fig. 1.3-1 の通り、それぞれについて対象を定めることとした。

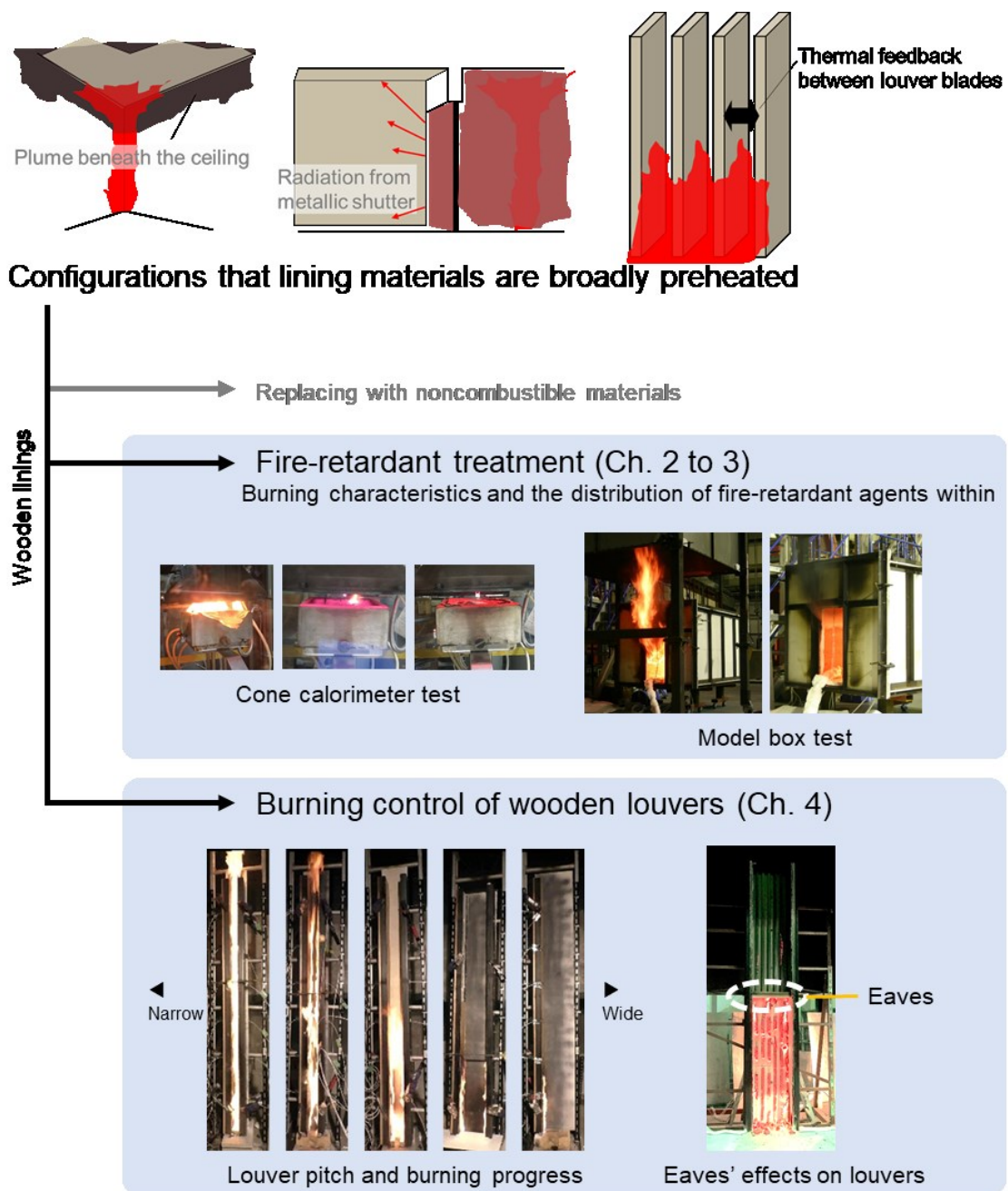


Fig. 1.3-1 Interests in this research positioned in some typical configurations of building finishing

1.4 難燃化による燃焼制御

1.4.1 難燃処理木材とは

難燃処理木材は、一般に所定の薬剤を木材中に圧入、乾燥させることで製造される。既存建築物に使用されている難燃処理製品の多くは、リン酸系単体またはリン酸系・ホウ素系の混合薬剤で処理された木材であり、リン酸系、ホウ素系それぞれで作用機構が異なるため、仕上げ材用途にはリン酸系薬剤が混合される場合が多くなっている。

このリン酸系薬剤の主な作用機構は燃料自体を絶つということにあり、その機構は平田ら^{15, 16}の解説に詳しい。材内に固定されたリン酸系難燃薬剤は、加熱を受けると木材の炭化温度より低温で熱分解してラジカルを生成し、それらが木材に作用して脱水反応を起こす。すると、通常の熱分解では生じたはずの炭化水素（可燃性ガス）の原料は既に炭と水に分解されてしまっているため、温度が上がろうとも気相での燃焼は起こらなくなる。以上の機構によって、発炎燃焼が抑制される原理を説明している。また、ホウ素系薬剤の赤熱燃焼の抑制効果に注目した燃焼性の研究は文献¹⁷等が参照できる。

リン酸系難燃薬剤が主に発炎燃焼に対して抑制効果を持つことは、特に、仕上げ材用途において抑制すべき燃え広がりに対する効果が高いことから、化学的側面からみた木材に対する難燃化の作用については、既に必要な技術が確立していると考えられる。

1.4.2 難燃処理木材の現状の課題

難燃処理木材の使用中に生じる防火性能の変化について解決すべき問題は、その薬剤を信頼性高く含浸させる品質管理方法と、その確認方法にあるといえ、その一因は溶脱性にある。流通する薬剤の殆どは木材成分に固着せず、また水溶性である。そのため、半屋外以上の環境では雨がかりや結露に起因して薬剤が流れ出し、薬剤の総量そのものが減ってしまうという懸念がある^{18, 19}。もう一つは薬剤の材内における偏在である。難燃処理木材の製造は、薬液の水溶液を木材全体に圧入・乾燥することで行われるが、種々の要因によって挽板の中央に所望の薬剤量が得られない場合が多い。この理由には、そもそも薬液自体が十分に行き渡っていない可能性もあるが、たとえ理想的に注入されたとしても、乾燥時の水分移動によって材表方向に吸い出されることが分かっている²⁰。同じ理由で、建物の竣工後に、難燃処理材が吸放湿を繰り返すことでも薬剤が材表方向に吸い出されることが分かっている。これはコンクリート材料と同様に白華と呼ばれ、見た目に分かるほど薬剤が析出して材表が白っぽくなったり、結晶が見えたりするので防火性能も低下しているのではないかという懸念の元となっている。このように、使用時の難燃処理木材の性能に関する懸念に応えていくことが現在、求められており、事前評価の枠組みについては次節で紹介する通り、検証がなされているところである。

1.4.3 優良木質建材等認証 (AQ)

JAS のカテゴリに該当しない木質製品を許認可する制度として、公益財団法人 日本住宅・木材技術センターが定める AQ(Approved Quality)認証がある。内外装仕上げに用いられる難燃処理木材にはそれぞれ、白華抑制に有効な塗装等の処置を施したものについて AQ 認証の枠組み (N-1) が定められている。

屋内における白華性評価は、乾燥・高湿度環境への繰り返し暴露によって人工的に吸放湿を起こすことで行われ、現行の試験サイクルは下記のように定められている。

(40℃90%RH 24 時間 → 60℃送風乾燥 24 時間)×5 サイクル

これについて、菊地ら²¹、河原崎ら²²は白華の支配要素を明らかにするため、上記の試験法と同様に難燃処理木材を高湿度環境下に暴露して質量変化を経時的に計測している。これを参照すると、例えば厚 18mm の板材の吸湿が概ね停止するのは暴露開始から 4 日が経過した後であり、現実的に起こりうる程度の期間かつ AQ の試験時間よりも長いことが分かる。つまり吸放湿が早い材料のスクリーニングは現行規格でも出来るのかもしれないが、吸放湿が遅い材料について、実環境では白華するのにも拘わらず、試験では白華が生じないといった乖離や、白華に続いて生じる溶脱量の絶対評価において実環境と差が生じてしまう可能性があるといえる。

1.5 空間設計・部材配置による燃焼制御

1.5.1 平坦な壁面上の火炎伝播に関する既往研究

平坦な鉛直壁面での火炎伝播に関する研究には、火炎伝播予測式との整合を検証したものが下記のほかに多く存在するが、本節では、おもにこれらの解および実験的側面に注目する。

Orloff ら²³は、外部輻射を与えない条件下で、初期の燃え広がりに対しては熱的に厚いと思わせる厚さ 45mm の PMMA (アクリル樹脂) の鉛直平板を燃焼させ、火炎伝播過程と着火後の燃焼を分析した。火炎伝播速度については発散して $y=Cx^A$ 型の関数で表現されることを示した。さらに、着火後の安定した燃焼における質量減少速度について、火炎に由来する放射の増加によって上方ほど高くなることを示した。

Quintiere²⁴らは鉛直面で外部加熱を受ける 28.4cm 角の板材 (particleboard, aircraft panel, flexible foam, carpet, rigid foam, PMMA) の上方における入射熱流束の分布を実測し、火炎高さが発熱速度の 2/3 乗に比例すること、各時点における火炎片の高さで無次元化した壁面への入射熱分布は、少なくとも火炎高さ 0.3~1.4m の範囲で相似的事であることを明らかにしている。

Hasemi ら^{10, 25}は、熱分解領域の到達高さが口火火炎高さに比例することを実験的に報

告している。さらに、木材を含め、炭化を生じる材料に特有の消炎が火炎伝播の収束・発散や燃え止まり高さに及ぼす影響を理論的に示すとともに、放射加熱を受けるパーティクルボードの加熱実験から、およそ 10kW/m^2 までの予熱は着火後の発熱ピークを増大させる一方で、 15kW/m^2 を超える予熱では、却ってピークが小さくなることを明らかにしている。

Brehob ら²⁶⁾は、材種（綿織物、PMMA、パーティクルボード、ポプラ、無処理合板、難燃処理合板、ハードボード、段ボール）、予熱（ 2.2kW/m^2 ）、放射加熱（ $0\sim 15\text{kW/m}^2$ ）、口火の規模の影響（ $3.6\sim 18.5\text{kW/m}$ ）を実験的に報告している。予熱の無い場合、PMMA とハードボードのみ持続火炎伝播が生じ、火源 18.5kW/m 、外部加熱 7.6kW/m^2 では難燃処理合板、綿織物以外の材料で持続火炎伝播が生じた。また、パーティクルボードを用いた実験より、火源発熱速度は燃焼範囲に影響するが持続火炎伝播の発生有無には影響しないこと、持続火炎伝播の発生条件とならない外部加熱強度であっても、熱平衡となるまで予熱を与え続けた後に着火した場合には持続火炎伝播に至ること、同一の材種では厚い方が僅かに火炎伝播速度が遅くなること等を報告している。

本研究への示唆は、木材の場合、外部からの加熱を受けない状況では火源火炎の高さと一定の範囲内で燃え止まること、燃え止まらなくなる条件として、一般に外部放射 5kW/m^2 程度が閾値となっていることである。

1.5.2 建築の部位・形状の影響

ルーバーに類する立体配置で可燃物の燃焼を検証した例として、文献^{27~29)}が挙げられる。Tamanini ら²⁹⁾は、液体の燃料（メタノール又はメタノールとトルエンの混合物）を浸み込ませた約 $0.5\times 1\text{m}$ の壁体 2 枚を向かい合わせた実験を行い、平板間の距離をパラメーターとして壁高さ/壁間の距離と燃焼速度の関係を得ている。

菊地ら¹⁴⁾は、幅 5mm または 9mm 、深さ 9mm の溝を切った木材について、溝の有無および数が発熱に及ぼす影響を実験的に明らかにするとともに、鉛直面での持続火炎伝播の発生有無を検証した。溝の増加に伴って平均発熱速度は増加し、その増加率は加熱表面積の増加率によって凡そ推定されること、溝の有無は燃え止まり高さに影響するものの、持続火炎伝播の発生有無には影響しないことを明らかにしている。

これらから、ルーバーのように可燃の面が対向する場合にも燃焼が促進されることは予想されるが、木材を用いた系統的な検証例は筆者の把握する限り存在せず、ルーバー等については基礎的な燃焼性や、燃焼が局所に留まる平面形状の条件より整備する必要があるといえる。また、火源となる火炎高さと焼損範囲の比に相似性が成り立つことは、小型実験によって燃焼性状を割合、簡易に予測することが出来るという特性であると同時に、実火災において家具等が火源となった場合を想定すると、設計の自由度が大幅に制約されることも意味する。したがって、燃焼を局限化するためには持続火炎伝播を生じさせないことは勿論のこと、ある程度の面積ごとに延焼を防止するといった対策も、空間設計の自由度と火災安全性の両立に対して有用であると考えられる。そこで、本論文では、木製架構自体が燃え止

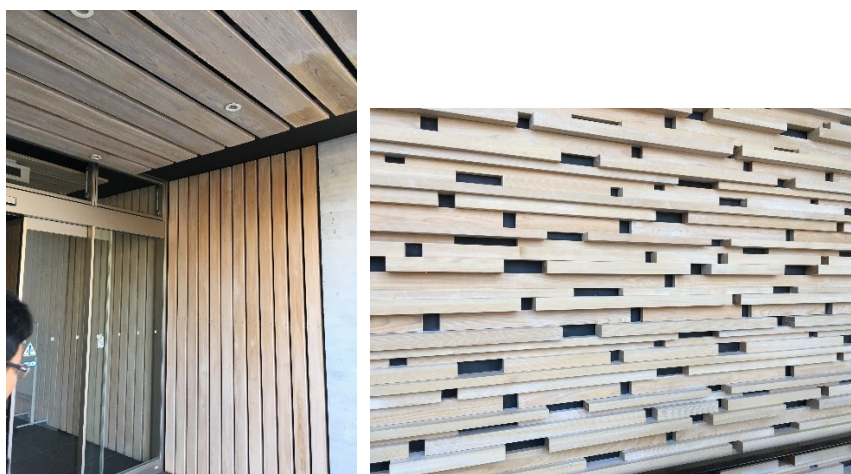
まり性能を持つための条件を、影響因子を限定した実験条件のもとで明らかにしつつも、より実用を見据えて、不燃材の張り出し（以下、庇と呼称）による防火措置の効果についても実証実験を行うこととする。

文 献

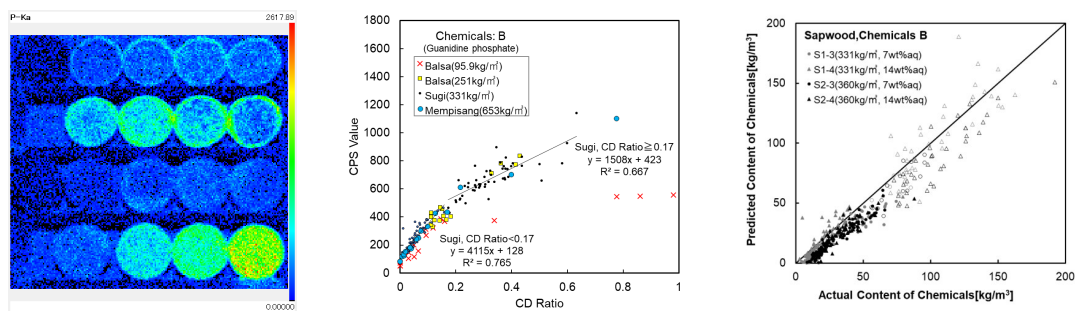
- 1 国土交通省発表「建築基準法の一部を改正する法律（平成 30 年法律第 67 号）について」,
http://www.mlit.go.jp/jutakukentiku/build/jutakukentiku_house_tk_000097.html (最終閲覧日：2020 年 1 月 1 日).
- 2 木のまち・木のいえ推進フォーラム：第一回中高層大規模木造建築物に関するアンケート調査結果, 21-24 (2011).
- 3 J., Rice and R.A. Kozak, M.J. Meitner, D.H.Cohen: Appearance wood products and psychological well-being, *Wood and Fiber Science*, **38**(4), 644-659 (2006).
- 4 増田稔：複合材料研究と感性・II. 木目の親和性はどこから？、日本複合材料学会誌 **19**(6), 208-215 (1993).
- 5 Y., Tsunetsugu, Y., Miyazaki, H., Sato: Physiological effects in humans induced by the visual stimulation of room interiors with different wood quantities, *Journal of Wood Science* **53**, 11-16 (2007).
- 6 平舘良一：旭川駅について，林産試だより，2015 年 8 月号, <http://www.hro.or.jp/list/forest/research/fpri/dayori/index.htm> (最終閲覧日：2020 年 1 月 1 日).
- 7 木造建築技術先導事業採択プロジェクト事業報告書(事例集)：高知県自治会館新庁舎建築工事, http://www.sendo-shien.jp/case_archive/download/jirei26.pdf (最終閲覧日：2020 年 1 月 1 日).
- 8 出口嘉一，長岡勉，岡崎智仁，白波瀬智幸：避難安全検証法の内装制限の適用除外規定を活用した木質内装の実現，日本建築学会技術報告集 **20**-45, 599-604 (2014).
- 9 国土交通省：官庁施設における木造耐火建築物の整備手法の検討会（第 3 回）資料 <http://www.mlit.go.jp/common/000210562.pdf> (最終閲覧日：2020 年 1 月 1 日).
- 10 Y., Hasemi and N., Yasui: A strategy to develop engineering upward flame-spread evaluation methodology based on the linearized flame height approximation, *Fire Science and Technology*, **15**(1&2), (1995).
- 11 三木邦宏，中林卓哉，長谷見雄二，吉田正志，若松孝旺：区画内装の実大燃焼実験その 1 実験方法と所見，日本建築学会大会学術講演梗概集, 1073-1074,(1990).
- 12 中林卓哉，三木邦宏，長谷見雄二，吉田正志，野原聡哲，若松孝旺：区画内装の実大燃焼実験その 2 火炎伝播と入射熱の関係，日本建築学会大会学術講演梗概集, 1075-1076,(1990).

-
- 13 国土交通省基準整備促進事業 F7「木質内装空間の部分的な不燃化による避難安全・延焼防止の効果に関する検討」
 - 14 菊地伸一, 長谷見雄二: 木材の燃焼発熱性および火炎伝播性に及ぼす表面形状の影響, 木材学会誌 **50**(2), 99-105 (2004).
 - 15 平田利美, 阿部寛, 福井康夫: 防火薬剤に関する研究 (Ⅱ)ハードボードの燃焼と熱分解に及ぼす防火薬剤の効果, 林業試験場研究報告 **200**, 155-184 (1967).
 - 16 平田利美: 木材難燃化のメカニズム, 木材工業 **44**(5), 202-207 (1989).
 - 17 菊地伸一, 前田恵史: 木材の発熱速度におよぼす難燃剤の効果, 木材学会誌 **53**(5), 276-282 (2007).
 - 18 原田寿郎, 片岡厚, 松永浩史, 上川大輔, 亀岡裕史, 木口実: 屋外暴露後の難燃処理塗装木材の耐候性と防火性能, 木材保存, **39**(1), 16-23 (2013).
 - 19 原田寿郎, 上川大輔, 亀岡祐史: 難燃処理塗装木材の 5 年間屋外暴露後の薬剤残存量, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 3010 (2017).
 - 20 上川大輔, 原田寿郎, 服部順昭, 安藤恵介: 溶脱法による難燃処理木材中の薬剤量分布測定. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 3075 (2014).
 - 21 (公財)日本住宅・木材技術センター: 難燃薬剤処理木材の品質管理基準等の検討 事業報告書 (2018).
 - 22 河原崎政行, 平林靖: 防火木材における白華の発生要因の検討, 木材保存 **40**, 17-24 (2014).
 - 23 L., Orloff, J. DeRis and G.H. Markstein: Upward turbulent fire spread and burning of fuel surface, Proceedings of 15th Symposium on Combustion. The Combustion Institute, Pittsburgh, PA, 183-192 (1975).
 - 24 J. Quintiere, M., Harkleroad and Y., Hasemi: Wall flames and implications for upward flame spread, *Combustion Science and Technology* **48**(3-4), 191-222 (1986).
 - 25 Y., Hasemi, N., Yasui and M., Yoshida: Upward flame spread along a vertical solid for transient local heat release rate, Proceedings of the 4th international symposium, 385-396 (1994).
 - 26 E.G. Brehob, A.K. Kulkarni: Experimental measurements of upward flame spread on a vertical wall with external radiation, *Fire Safety Journal* **31**, 181-200 (1998).
 - 27 J.S., Kim, J., DeRis and F.W., Kroesser: Laminar burning between parallel fuel surfaces, *International Journal of Heat Mass Transfer* **17**, 439-451 (1974).
 - 28 M., Foley and D.D., Drysdale: Heat transfer from flames between vertical parallel walls, *Fire Safety Journal* **24**, 53-73 (1995).
 - 29 F., Tamanini, A. N., Moussa: Experiments on the turbulent burning of vertical parallel walls, *Combustion Science and Technology* **23**, 143-151 (1980).

第2章 蛍光X線分析による難燃処理木材内の薬剤分布の計測法



Efflorescence seen in semi-outdoor and interior usage
(Left: Kochi prefecture hall, right: Kochi castle museum of history)



Mapping of fire-retardant chemicals using X-ray fluorescent analysis

2.1	目的と背景.....	2-3
2.2	研究方法	2-5
2.3	分析装置の概要および精度の考え方	2-5
(1)	蛍光 X 線分析	2-5
(2)	検量線法と分析精度の考え方.....	2-6
2.4	蛍光 X 線分析の精度に関する検証	2-7
2.4.1	実験装置.....	2-7
2.4.2	分析条件.....	2-8
(1)	管電圧	2-8
(2)	管電流	2-8
(3)	ピクセルサイズ.....	2-8
(4)	コリメーターサイズ	2-8
(5)	ドゥエルタイム.....	2-8
2.4.3	試験片	2-8
(1)	X 線透過深さ検証用スギ試験片	2-8
(2)	相対標準偏差評価用の試験片	2-9
(3)	難燃処理スギ試験片	2-10
2.4.4	溶脱法による薬剤量計測	2-10
2.4.5	結果と考察.....	2-14
(1)	X 線透過深さの検討	2-14
(2)	相対標準偏差の導出	2-15
(3)	難燃処理木材の基材密度の影響と検量線の検討.....	2-17
(4)	スギに対する蛍光 X 線分析の適用可能性.....	2-19
2.5	カラーマッピング画像の解像度の検討.....	2-21
2.5.1	実験方法.....	2-21
(1)	試験片	2-21
(2)	分析条件.....	2-21
2.5.2	結果と考察.....	2-21
2.6	計測条件ごとのマッピング出力値と薬剤量の関係の検討.....	2-24
2.6.1	実験方法.....	2-24
(1)	試験片	2-24
(2)	蛍光 X 線分析	2-24
(3)	溶脱法による薬剤量計測	2-24
2.6.2	結果と考察.....	2-25
2.7	まとめ	2-28

2.1 目的と背景

本章では、難燃処理木材内部の薬剤量の分布を蛍光X線分析により計測する方法を導出する。この薬剤分布計測法を用いて第3章では薬剤分布と火災安全性の関係性解明を進める。

木材の燃焼には、気相にて可燃ガスが燃焼する発炎燃焼と、炭化物がその表面付近で酸素と結合して発熱する赤熱燃焼がある¹。通常木材の燃焼では、まず加熱された木材の熱分解により発生した可燃ガスが火炎を伴って燃焼する。木材の炭化が進むと、可燃ガスの発生量が減少すると火炎が維持されなくなることに加えて、炭化物付近まで新鮮空気が到達するため赤熱燃焼での発熱が支配的となる。木材を難燃処理した場合、含まれる難燃薬剤の量を増やすにしたがって発炎燃焼に伴う発熱が少なくなり、ある程度以上の薬剤ではほとんど火炎を生じなくなる。Fig. 2.1-1は、難燃薬剤処理した木材の一定時間内の総発熱量（縦軸）と含まれる難燃薬剤量（横軸）のイメージである。現在主に流通するリン酸を主成分とした難燃薬剤では、比較的低量で発炎燃焼を抑制でき、以降は薬剤の添加量を増やしても赤熱燃焼の抑制効果の伸びは緩やかとなる²。

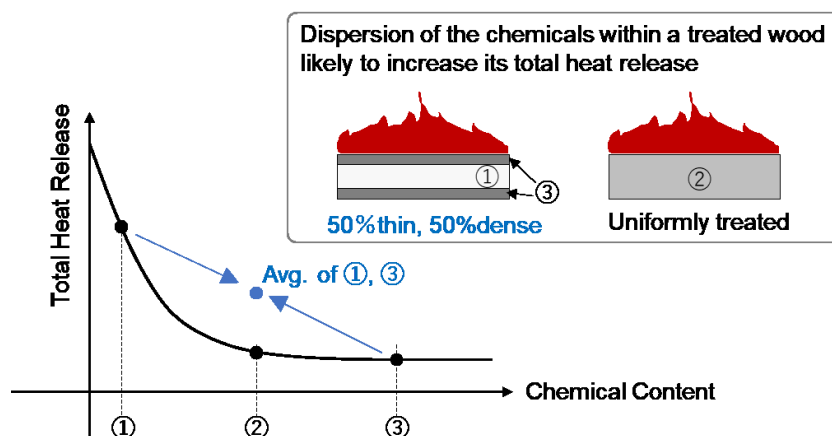


Fig. 2.1-1 Possible effect of chemical dispersion on heat release

このように発炎燃焼の抑制が生じる薬剤量付近を境に薬剤の効果が変わり、発熱量 - 薬剤量グラフが下に凸の形状となるという特性に起因して、同じ平均薬剤量の難燃処理木材であっても、偏在の程度の大きい場合は、偏在が小さい場合よりも発熱が増加すると予想される。これは、平均より薬剤が不足する部分における発熱増加分は、薬剤が過剰な部分における発熱量の抑制分よりも大きくなるためである。ただし、薬剤の厚み方向の偏在、特に後述する文献にあるような、材料の表面付近が高濃度、内部が低濃度、といった材厚方向の薬剤分布については、表層に近い部分の薬剤量が支配的になる可能性も高く、単純に偏在の程度だけではなく分布の傾向と防火性能との対応を検証する必要がある。しかしながら、これ

までに難燃処理木材の材厚方向の薬剤分布と防火性能との関係性について報告された例は見られない。

これらの検証のためには、防火性能試験等に従われる難燃処理木材について予め難燃薬剤の分布性状を把握しておく必要があるが、近年まで難燃処理木材内の薬剤分布を把握する方法は研究されていなかった。2010 年前後から、防火材料の性能評価において難燃処理木材の薬剤偏在への対処を問われるようになったことや、処理材の耐候性や経年劣化が徐々に注目されるようになったこともあり、幾つかの研究が進められている。難燃処理木材中の薬剤分布を把握する手法として、河原崎ら^{3, 4}は注入後のラミナの絶乾密度分布から材軸方向の薬剤分布を推定する手法を提案している。また、上川ら⁵は難燃処理したひき板から小試験片を切り出し、それらを水に浸漬することで薬剤を溶脱させ、絶乾密度の重量差から薬剤量を計測する方法(溶脱法)を提案しており、さらに、小試験片を更に細分化することで処理材断面内の薬剤分布をある程度把握出来ることを明らかにしている^{6, 7}。この手法は特殊な設備が不要な点において優れるが、手作業による分析が多く、また分布を詳細に分析しようとするほど、計測の手間を要する。

他方、微細な領域の薬剤分布を把握する方法として、渥美らは X 線透過観察によって 2 次元的に⁸、マイクロフォーカス X 線 CT 装置によって 3 次元的に、材内の薬剤分布を可視化できることを明らかにしている⁹。また、岡村ら^{10, 11}はマイクロフォーカス X 線 CT 装置を用いて、注入乾燥後の密度分布と処理前の密度分布の差分を取ることで、難燃薬剤の分布を計測する手法を明らかにしている。他に、難燃処理材中の元素分布を可視化する手法として、電子線を試料に照射して特性 X 線を検出する EPMA (Electron Probe Micro Analyzer) や SEM-EDXA (Scanning Electron Microscope-Energy Dispersive X-ray microanalyzer) 法、X 線を照射して特性 X 線を検出する蛍光 X 線分析などの手法があり、原田らは促進耐候性試験に供したリン酸系難燃処理木材について SEM-EDXA 観察を行った結果を報告しているほか¹²、古野らはホウ素系難燃処理木材に対し EPMA 観察を行った結果を報告している¹³。

上述のように難燃処理木材中の薬剤量や分布を推定する手法は幾つかあるが、ラミナ内の分布を簡易に可視化するには、薬剤の成分元素を直接検出する方が適している。この手法については安藤ら¹⁴、上川ら¹⁵による蛍光 X 線分析を用いた計測法が参考にでき、これまでに試験片から切り出したスライス断面におけるリン元素の分布状況を CPS 値 (Count per second: ここではリン元素の $K\alpha$ 線の強度に基づく元素の 1 秒当たりのカウント数) のマッピング像として可視化できることが明らかにされている。蛍光 X 線分析装置を用いると、適度な解像度にてラミナ断面程度の比較的広い範囲の薬剤分布を簡易に把握することが可能といえるが、現状では計測データから難燃薬剤の絶対量の分布を導出することはできていない。また、難燃処理木材に対して蛍光 X 線分析を行う際の計測条件の妥当性についても未検証な部分が多い。

2.2 研究方法

以上のような背景から、本章では蛍光 X 線分析の際の計測条件等が計測結果に与える影響を明らかにするとともに、難燃処理木材内部の薬剤量の分布を蛍光 X 線分析により計測する方法を導出することを目的とし、以下のような検討を進めた。

- ・ 蛍光 X 線分析の精度に関する検証
- ・ X 線透過深さの検討
- ・ 蛍光 X 線分析装置の出力値の相対標準偏差についての検討
- ・ 難燃処理木材の基材密度の影響と検量線の検討
- ・ スギに対する蛍光 X 線分析の適用可能性
- ・ カラーマッピング画像の解像度の検討
- ・ 計測条件ごとのマッピング出力値と薬剤量の関係の検討

まず難燃処理木材の木口面の蛍光 X 線分析に必要なサンプル厚さの検討として、木材に対する X 線の浸透深さを把握することによって、計測値の大小にサンプル厚さが影響しないことを確認した。また、難燃処理木材サンプルの同一視野を蛍光 X 線分析装置で多重計測し、リン元素計測の出力値のバラつき（相対標準偏差）についての検討を行った。その上で、実際の難燃処理木材について蛍光 X 線分析マッピングと、溶脱法による実際の薬剤量の計測を行い、両結果を突き合わせることで、計測条件ごとのマッピング出力値と薬剤量との関係を検討した。さらに、幾つかの計測条件について、蛍光 X 線分析の相対標準偏差を算出して定量分析としての信頼性を評価した。最後に蛍光 X 線分析の出力[cps]と薬剤量[kg/m³]の検量線を作成し、スギに対して適用して実測値との比較を行った。

2.3 分析装置の概要および精度の考え方

(1) 蛍光 X 線分析

蛍光 X 線分析は表面組成分析の手法の 1 つであり、物体表面に細く絞った X 線を照射して、励起された特性 X 線を波長またはエネルギーでスペクトル解析することで、含まれる元素を同定することができる。このとき一般に、特性 X 線の強度は元素濃度に比例することが知られており、元素濃度が定量できるとされている¹⁶⁻¹⁸。

本検討では、広範囲のマッピングが可能な装置としてエネルギー分散型蛍光 X 線分析装置（機種：日立ハイテクサイエンス社製 SEA-6000VX）を使用した(Fig. 2.3-1)。X 線源から発生した X 線は、整流用のコリメーターおよび特定のエネルギー域をカットするフィルターを通過した後、試料に照射される。試料に照射された X 線はある程度の深さまで浸透し、すり鉢状に反射する。使用した SEA-6000VX の場合、X 線は上面から垂直に照射され、

励起 X 線は装置上斜め 45° 方向に向けて取り付けられた検出器で検出される。試料の側を NC 制御されたステージによって動かしながら、最大 200×250mm 程度の領域を分析していく。

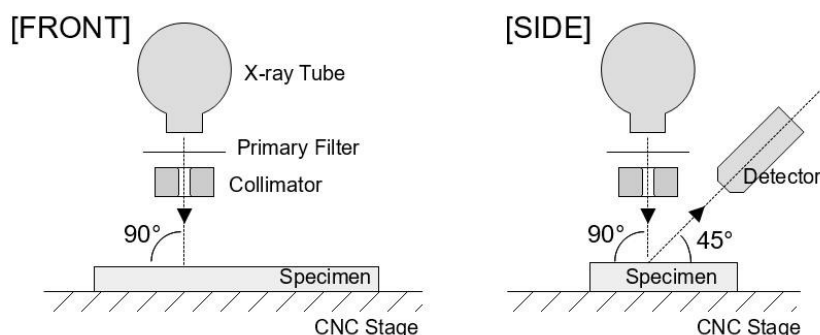


Fig. 2.3-1 Geometry for measurement using X-ray fluorescent analysis equipment

(2) 検量線法と分析精度の考え方

標準試料を用いて予め把握しておいた物質の濃度と、分析装置から出力される電気信号の強度などの関係から、評価対象とする試料の濃度を逆推定するのが検量線法である。このとき得られる測定値の確かさについては、昨今の分析装置は自動化が進んでいるため、殊更に配慮すべき機会は多くないが、本検討は下記の通り、標準試料が無く、難燃処理木材を使用して検量線の検証を行うため、木材の組織構造の影響の可能性や試料に含まれる難燃薬剤量の計測誤差など幾つか特異な点があり、分析精度の考え方について理解を深めておく必要があったため、検量線法に基づいて物質の定量を行う他の実験装置を使用する際に生じる誤差評価に関する文献^{19, 20}を参照しながら進めている。

本検討で対象とするリン元素の標準試料は頒布されていない。また、標準試料は未知試料と組成が近いものが好ましい。今回は試料の制約により、本装置のメニューとして用意されている検量線法が適用できなかったため、通常とは異なる手順を取って検量線を作成した。

計測にかかわる誤差に関して、アナログな計測では、検量線を作成する際の誤差と未知試料を計測する際の誤差要因は同一であるので、検量線を作成する際のプロットのばらつきが、そのまま推定値の誤差になると考えて良いが、本検討の場合には、検量線を導出する際と未知試料を計測する際には不確かさが異なる。本検討では、検証線導出に用いるサンプルは細胞壁や導管等の組織構造を持つ木材を難燃処理したものであり、それに含まれる難燃薬剤（リン元素）の濃度は既知ではないうえ、ある程度の分布が存在する状態となっている。難燃薬剤の濃度は、蛍光 X 線分析後のサンプルに対して溶脱法による薬剤量計測（2.4.4 参照）を実施することで把握する。すなわち、蛍光 X 線分析そのものに起因するばらつきは、検量線を導出する際も実際の計測でも同じように生じる一方で、溶脱法に起因するばらつきは検量線を導出する際に影響するのみで、いったん検量線が定まってしまえば、検量線の位置の不確かさとして（ベイズ確信区間ではなく、95%信頼区間として）残るのみであり、

影響度合いが大きく異なる。本検討では前述の文献を参考に、分析値の精度を確認したのち、マッピングの検討を進めた。

2.4 蛍光 X 線分析の精度に関する検証

2.4.1 実験装置

実際の装置は Fig. 2.4-1 の通りで、試料はメーカー純正の粘着フィルムに貼り付けて分析することが推奨されているが、この方法ではサンプルの傾きを拘束することができず、検出器との距離も一定にならないので分析精度に影響を及ぼす可能性がある。そこで、Fig. 2.4-2 のようなクランプ型の治具をステンレスで製作してサンプルの固定に使用した。

計測結果は 1 点ごとのスペクトルデータの集合として得られ、本装置の制御ソフトウェアにより任意の元素のマップデータを CSV ファイルとして書き出すことができる。本検討では、リン元素のほかに Fe 元素のマップデータを書き出し、Fe 元素のマップデータから作成したマスクを用いてリン元素マップデータから試験片部分のみを切り抜くことで分析結果の正確性を確保した。

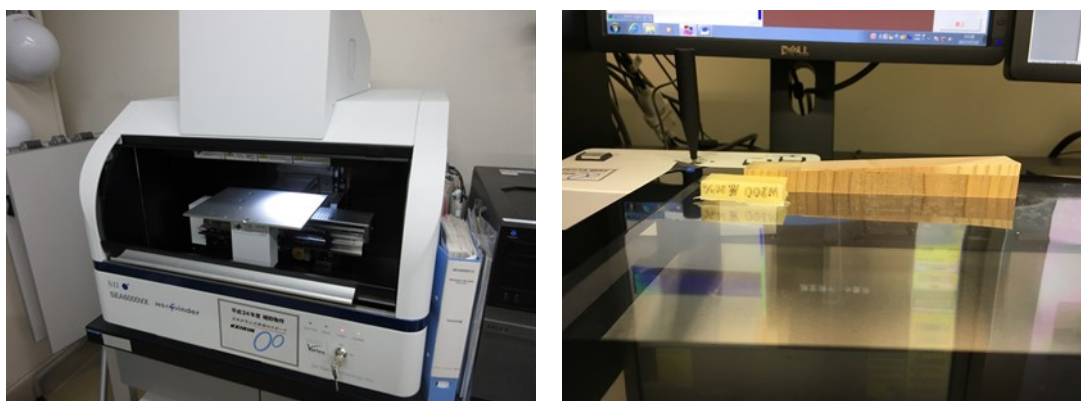


Fig. 2.4-1 The X-ray fluorescent analysis equipment (Hitachi High-tech SEA-6000VX)



Fig. 2.4-2 Clamp-shaped sample holder equipped for X-ray fluorescent analyses

2.4.2 分析条件

蛍光 X 線分析を行うにあたって設定する条件は下記(1)～(5)に示す通りであるが、(1)(2)は計測対象とする元素から自ずと決定され、(3)～(5)は測定の実施によって選択することが出来る。本検討では、以下のように設定した。

(1) 管電圧

リン元素に X 線を照射した際に励起される $K\alpha$ 線を発生させるために必要な電圧 $K(ab)$ は 2.142kV であり、管電圧にはこれ以上の電圧が必要であるが、過剰な管電圧のもとでは散乱 X 線の割合が増加して検出感度が下がることとなる。本実験で用いた装置は管電圧が 15～50kV の範囲で選択可能であるので、上記を考慮して 15kV の管電圧で分析を行った。P- $K\alpha$ 線として検出した ROI (Region of Interest; エネルギー幅) は 1.88～2.15keV である。

(2) 管電流

管電流は照射する X 線の量を決定するため、測定の実感度に寄与する。本装置では 20～1000 μ A の範囲で選択可能であるが、試験片の帯電や損傷が生じないことを確認したうえで、上限である 1000 μ A の管電流で分析を行った。

(3) ピクセルサイズ

木材試料を対象とするため、早晚材(年輪)の判別が可能な程度の精細さが得られることを条件に、0.5×0.5mm とした。

(4) コリメーターサイズ

コリメーターは照射する X 線の絞りに相当し、ピクセルサイズと同等か、やや大きいものを選定することが推奨されている。本装置では 0.3, 0.5, 1.2, 3.0mm 四方の 4 条件が選択できる。本検討では (3) を踏まえ、1.2×1.2mm を選定した。

(5) ドゥエルタイム

ドゥエルタイムは 1 ピクセルあたりの分析時間であり、一般には測定値の偏差の低減に寄与する。本検討では、装置の設定範囲 20～200ms のうち最も短い 20ms を選定した。

2.4.3 試験片

(1) X 線透過深さ検証用スギ試験片

難燃処理スギ材 4.2(L)×18(R)×80(T)mm と、同じ難燃処理木材をクサビ形の無処理スギ材 0.70～7.00(L)×18(R)×80(T)mm で遮蔽したものの 2 パターンについて計測を行った (Fig. 2.4-3, Fig. 2.4-4)。難燃処理試験片の基材密度は 336kg/m³、薬剤量は 164kg/m³、クサビ形の無処理スギ試験片の密度は 331kg/m³であった。難燃処理スギ材は、300(L)×18(R)×105(T)mm のスギ辺材にポリリン酸カルバメート系薬剤溶液(濃度 25wt%)を減圧加圧処理(ゲージ圧により -0.09MPa で 30 分、+0.95MPa で 2 時間、-0.09MPa で 30 分のスケジュールで制御)にて注入、乾燥させ作製した。乾燥スケジュールは、28℃70%RH で 7 日間→60℃の恒温槽内で 7 日間とした。乾燥後、ひき板の繊維方向中央から試験片 4.2(L)×

18(R)×80(T) mm を切り出して、分析用の難燃処理試験片とした。

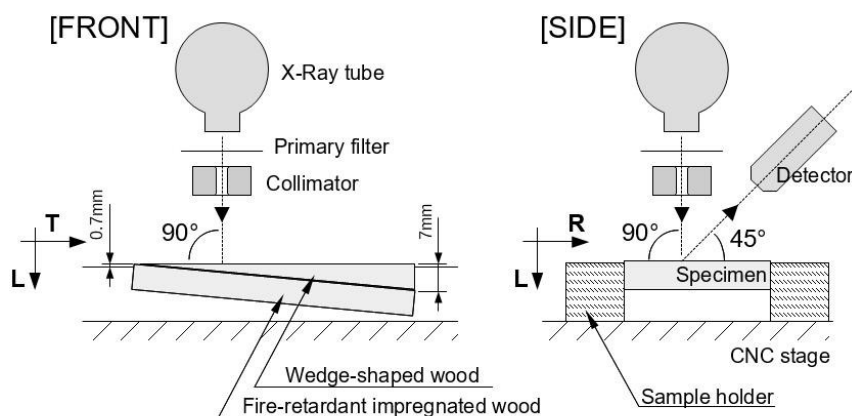


Fig. 2.4-3 Schematic diagram of X-ray fluorescent analysis on fire-retardant impregnated wood covered with wedge-shaped wood

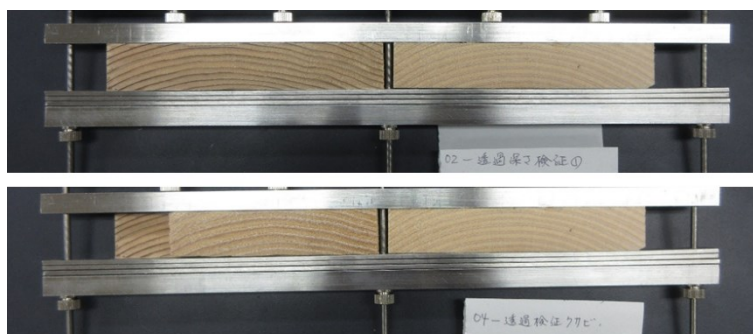


Fig. 2.4-4 Fire-retardant impregnated wood covered with wedge-shaped wood

(2) 相対標準偏差評価用の試験片

定量分析において生じる誤差は前述の通り、出力値自体の偏差と検量線のフィッティングの不良から生じる標準誤差に分けられ、計測精度への影響が大きいのは、一般には前者である。計測値が取りうるばらつきの範囲を把握するために、まずは木材試料として十分に均一と見做せる試料を調製して相対標準偏差を評価した。

難燃処理木材に対して蛍光 X 線分析を行うと、後述の通り、分析結果には早晚材（年輪）が写りこむ。したがって、出力値の大小には基材密度が影響すると考えられたので、早晚材の不明瞭な南洋材を基材に選び、難燃薬剤が分析面内に均一に分布するように処置しながら薬剤処理を行ったものを均一試料として調製した。調整した試料の同一視野に対して複数回の計測を行うことで蛍光 X 線の出力値の再現性を評価した。

また、出力値に対する基材密度の影響を評価するために、基材にはバルサ(全乾密度 95.9kg/m³ および 251kg/m³)とメンピサン(全乾密度 653kg/m³)の 2 種類を用意した。加え

て、薬剤の組成に起因する検量線の形状や傾きの差異を把握するために、薬剤には薬剤 A (ポリリン酸カルバメート系薬剤) と薬剤 B (リン酸グアニジン系薬剤) の 2 種類を選定した。試料は、分析面内に薬剤を均一に分布させるために以下の操作を行って調製した。まず各材料を $\phi 20\text{mm}$ 、 $L=100\text{mm}$ の丸棒に加工して、前述した 2 種類の薬剤を 2, 4, 6, 8, 16, 25, 33, 50 wt% の 8 通りに希釈した水溶液に浸漬し、減圧加圧法 (ゲージ圧により -0.09MPa で 30 分、 $+0.95\text{MPa}$ で 2 時間、 -0.09MPa で 30 分のスケジュールで制御) により薬液を圧入した。注入数は薬剤濃度 1 条件あたり 1 本で、各樹種とも同一の母材から採取している。また、一部は無処理のまま蛍光 X 線分析に供した。

薬液を注入した試験片は、乾燥時に難燃薬剤が RT 方向に移動しないように内径 18mm のシリコンチューブで側面全体を被覆した状態で乾燥 (28°C 70%RH で 7 日間 $\rightarrow 60^{\circ}\text{C}$ の恒温槽内で 7 日間) させ、乾燥後にテーブルソーを用いて、木口直近 10mm を除いた部分から 4.2(L) mm 厚の薄切り試料を 1 条件あたり 2 枚採取した (Fig. 2.4-5)。以上の操作により、分析面内での CPS 値の変動が少ない試料を調製することが出来た (Fig. 2.4-6-a, b)。溶脱法との比較を行いやすくするため、実際の計測には中央 4.2(L) \times 10(R) \times 10(T) mm を直方体状に切り出して用いている (Fig. 2.4-6-c, d)。

(3) 難燃処理スギ試験片

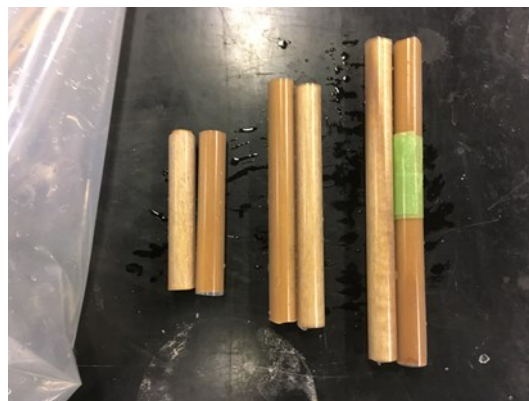
スギ辺材 (基材密度 $306\sim 359\text{kg/m}^3$)、心材 (基材密度 $313\sim 431\text{kg/m}^3$) の挽板を繊維方向に 4 分割し、各々を薬剤 2 種、薬液濃度 2 水準の 4 条件で処理して乾燥させた。難燃薬剤は(2)で使用した薬剤 A と薬剤 B であり、薬液濃度は 7、14% とした。注入時の寸法は 60(L) \times 25(R) \times 120(T) mm とした。難燃処理後、 28°C 70%RH で 1 週間、 60°C の恒温槽内で 1 週間乾燥させたのち、テーブルソーを用いて繊維方向中央から薄切り 4.2(L) \times 25(R) \times 120(T) mm を切り出して試料とした (Fig. 2.4-7 a, b)。

2.4.4 溶脱法による薬剤量計測

2.4.3 (1), (2) で述べた試験片は、蛍光 X 線分析に供したのち、検量線作成のために溶脱法⁷に供して薬剤量を求めた。(2) の南洋材試片については試片ごと (4.2(L) \times 10(R) \times 10(T) mm) の 1 体を採取して、小片ごとの薬剤量を計測した。2.4.3(3) のスギ試片については試片 1 枚を R (年輪と直交する方向) に 5 分割、T (年輪と平行な方向) に 24 分割して 4.2(L) \times 5(R) \times 5(T) mm ごとの薬剤量を求めた。



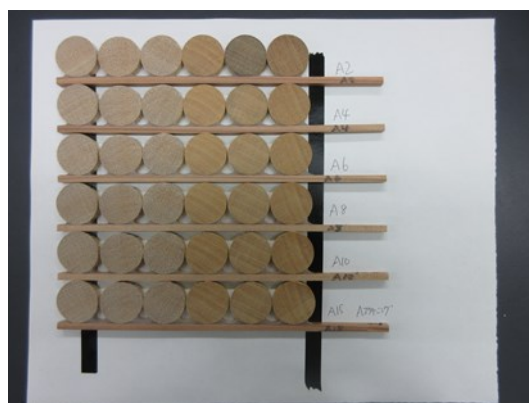
a



b



c



d

Fig. 2.4-5 Preparation of fire-retardant impregnated Lamin and Balsa

- a : preparation of wood cylinder with 20mm in diameter and 130mm in length
- b : enclosing into silicon tubes after impregnation
- c : cut specimens into slices 4.2mm thick
- d : measurement surface.

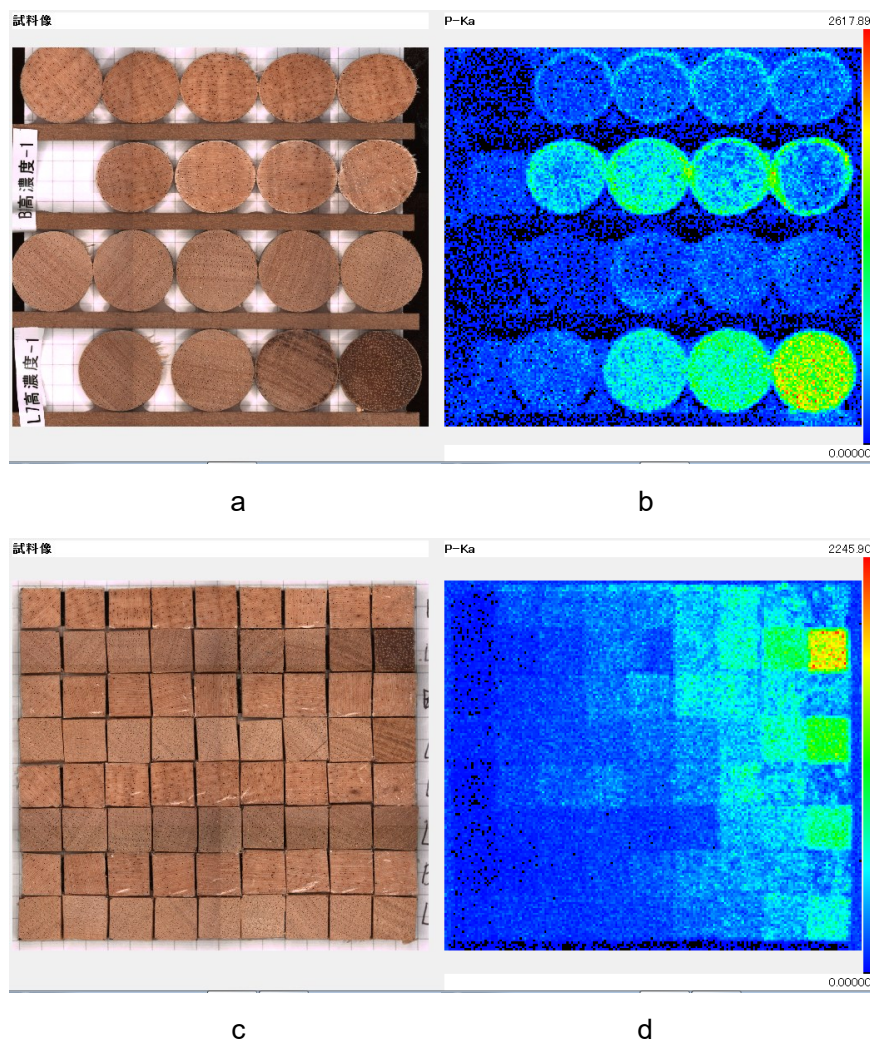
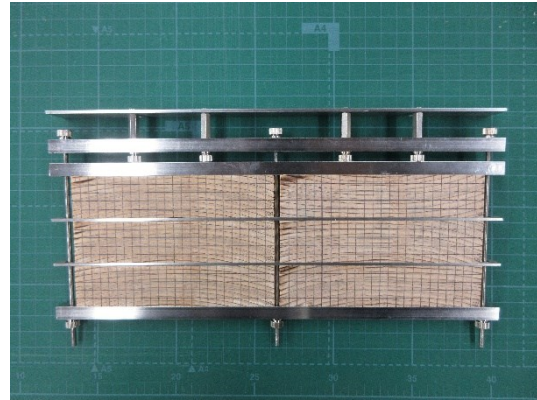


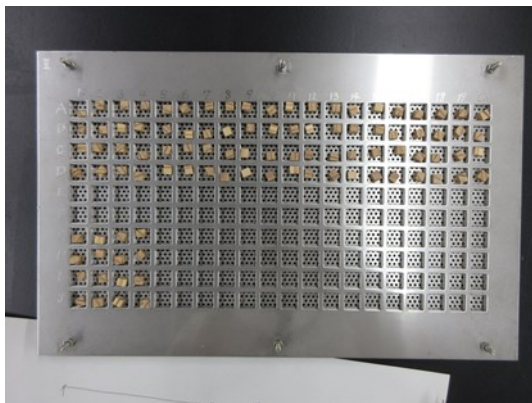
Fig. 2.4-6 X-ray fluorescent analysis image of the reference material
 -a, original cylindrical specimens, visual
 -b, original cylindrical specimens, X-ray fluorescent analysis
 -c, specimens center 10 × 10mm cropped, visual
 -d, specimens center 10 × 10mm cropped, X-ray fluorescent analysis



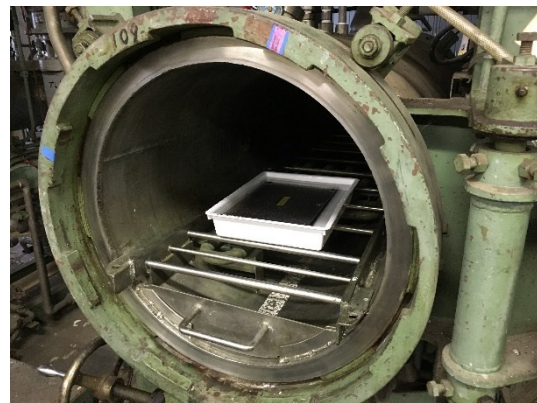
a



b



c



d

Fig. 2.4-7 Preparation of fire-retardant impregnated Japanese Cedar

- a : wood cuboids before processing
- b : sliced specimens taken from the center of the impregnated wood
- c : cut specimens for water leaching procedure
- d : pressure reduction during water leaching procedure

2.4.5 結果と考察

(1) X線透過深さの検討

2.4.3(1)で述べたX線透過深さ検証用のスギサンプルについて、各試験片木口面中央部の長辺方向を線分析した結果をラインプロファイルとしてFig. 2.4-8, Fig. 2.4-9に示す。横軸は試験片上の距離で、縦軸は検出されたリン元素($K\alpha$ 線)の1秒当たりのカウント数(CPS値(Count per second))を示している。②のクサビ形無処理片を載せたものについては、原点をクサビ形無処理スギの薄い側の端点としてある。

管電圧15kVのラインプロファイルから、①難燃処理試験片(impregnated wood)ではリン元素検出値としてCPS値が320~1650CPSとなっており、①に遮蔽物として②クサビ形無処理片を載せたものでは、どの位置でも0~100CPSに留まっている。後者において検出されている値は、遮蔽物の厚さによらずどの位置でも同じような値であることから、連続X線由来のバックグラウンドによるものと考えられる。これらから、クサビ形の無処理試験片の最薄部0.7mmであっても直下に在る難燃処理材のリン元素は検出されないことが分かった。管電圧50kVについても定性的な傾向は同様であった。したがって、深さ方向の分析領域は少なくとも0.7mm未満であると考えられ、分析する際の試験片の厚さは、数mm程度もあれば十分なことが分かった。

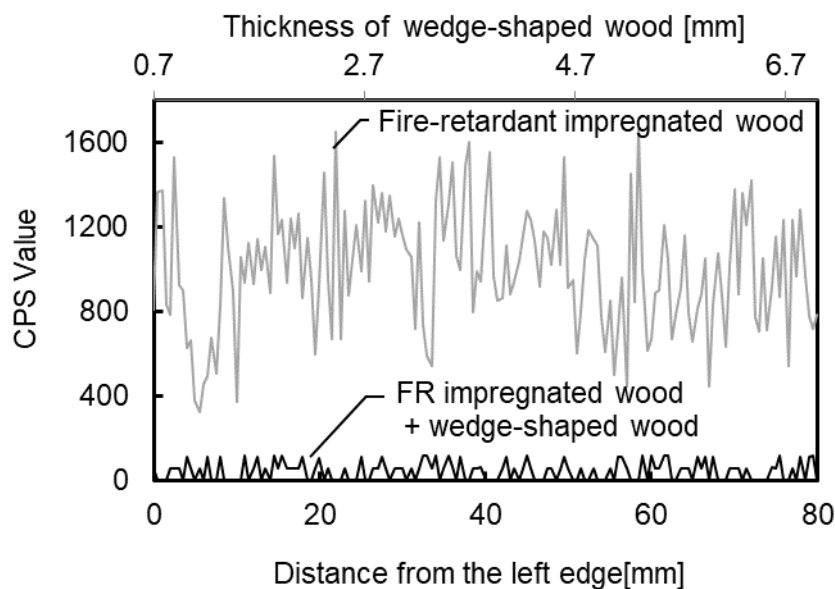


Fig. 2.4-8 Comparison of line profiles under the tube voltage of 15kV

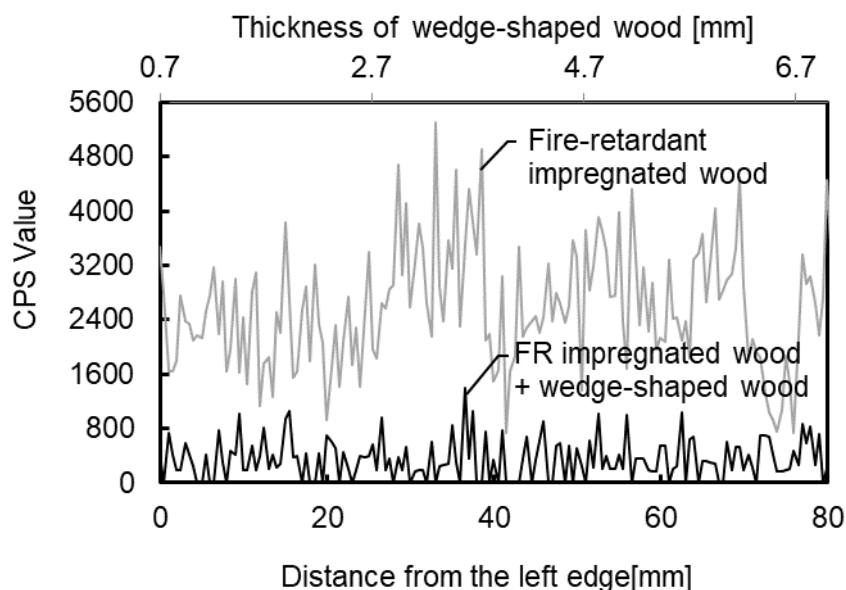


Fig. 2.4-9 Comparison of line profiles under the tube voltage of 50kV

(2) 相対標準偏差の導出

2.4.3(2)にて調製した試料の同一視野を蛍光 X 線分析装置で多重測定して、測定結果の相対標準偏差(RSD)を求めた(Fig. 2.4-10)。計測回数は 12 回とした。この結果、個々のピクセルで判断した場合のばらつきでは一般的な目安とされている相対標準偏差 10%²⁰ を超え、定量分析としての信頼性を持たないことが分かった。参考に、ドゥエルタイムを 2.5 倍 (50ms)とした結果を右列に併記する。図から分かるように、ばらつきが少なくなるピクセルも存在するものの、殆どのレンジにおいて相対標準偏差は 10%を上回っていることが分かる。特に多数の試料を扱う検討において、ドゥエルタイムを延長することによる精度の向上は現実的な解決策ではないから、ピクセル 1 点ごとの分析値が定量データとしての信頼性まで持ち合わせることは稀であること、したがって、マッピング画像のそのままでは分布のイメージとして理解する必要があることを念頭に置いて薬剤分布を考察する必要があると言えよう。

一方で、同 Fig.2.4-10 の下方に向かって示すグラフは、隣接するピクセル同士の平均値について相対標準偏差を求めたものである(順に 2×2、3×3、4×4 ピクセル)であるが、いずれの計測条件においても 4×4 ピクセル(2mm 四方)程度まで平均を取れば 200CPS 以上の計測レンジで相対標準偏差が 10%を下回ることが読み取れ、定量分析として十分な精度が確保できていることも分かった。これらより、蛍光 X 線分析の出力データから、2 mm 四方の解像度のものにデータを合成することで定量分析としての信頼性を確保することができるといえる。

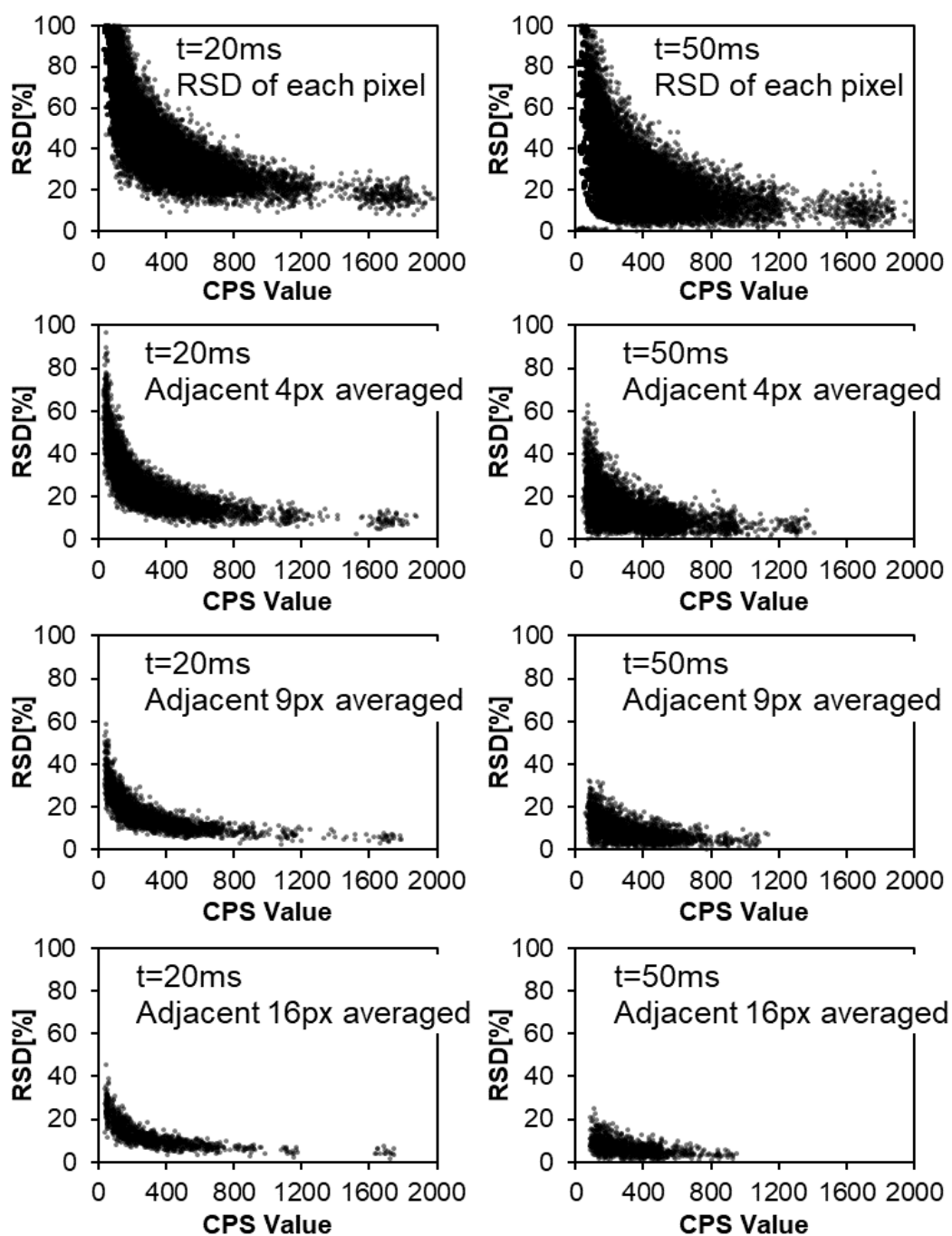


Fig. 2.4-10 Precision profiles of X-ray fluorescent analysis
RSD=relative standard deviation, t=dwell time.

(3) 難燃処理木材の基材密度の影響と検量線の検討

2.4.3(2)の試料について、それぞれの木口面に対する蛍光 X 線分析 (2.4.2) と、試料を細分化しての溶脱法による薬剤量計測 (2.4.4) を順に行い、出力値[CPS 値]と薬剤量[kg/m^3]を突き合せて比較した。Fig. 2.4-11 の縦軸に蛍光 X 線分析の結果を、横軸に溶脱法の結果をプロットして示す。この結果、基材密度ごとに傾向は異なり、薬剤が同量であっても基材密度の高い材において CPS 値が低く検出される傾向が認められた。この結果から、木材試料における CPS 値は単に薬剤量に比例する単一の曲線で表現されないことが確認された。一方で発熱性を議論する上では、木材実質の量に比例して薬剤の量が確保できていれば可燃性ガスの発生は抑制できると考えられるので、薬剤を絶対量でなくとも、基材密度に対する比などで表せれば有用である。Fig. 2.4-12 は薬剤量と基材密度の比 (CD Ratio と表記する) によって整理した結果であるが、CD Ratio<0.15 付近までは薬剤 A、B ともにいずれの基材密度においてもほぼ一つの直線で近似できるプロットとなった。また CD Ratio \geq 0.15 においても基材密度 $100\text{kg}/\text{m}^3$ のグループを除いては概ねまとまったプロットとなり、CPS 値と CD Ratio とが 1 対 1 で対応することが分かった。

以上のように、少なくとも基材密度 $250\text{kg}/\text{m}^3$ 以上であれば、CPS 値から薬剤量へと 1 対 1 の対応で換算できることが示唆された。この基材密度 $250\text{kg}/\text{m}^3$ 以上という範囲は、国内で難燃処理に用いられるほぼ全ての樹種の材が該当するといえる。また、CD Ratio<0.15、すなわちスギにおける薬剤量 $50\text{kg}/\text{m}^3$ 未満においては基材密度の影響はさらに小さいことも分かった。スギの発炎燃焼をリン酸系薬剤により抑制する為に必要な薬剤量が、3 章の検討より、 $40\text{kg}/\text{m}^3$ 近辺に存在することを考慮すると、燃え広がり等の議論を行う上で必要な計測レンジでは基材の密度分布が計測誤差に結びつくことなく高精度に薬剤量を推定できると考えられる。

さて、スギ難燃処理材についても他樹種と同様に CD Ratio<0.15 付近で異なる回帰を示す傾向が認められたので、2.4.2(4)で調製したサンプルのうち辺材を薬剤の 14 wt% 溶液で処理したサンプル 1 片に注目して回帰式を導出した。それぞれの薬剤に対する回帰式は Fig. 2.4-12 中に示すとおりであり、薬剤 A では CD Ratio=0.11、薬剤 B では CD Ratio=0.17 を閾値とした 2 直線を仮定している。

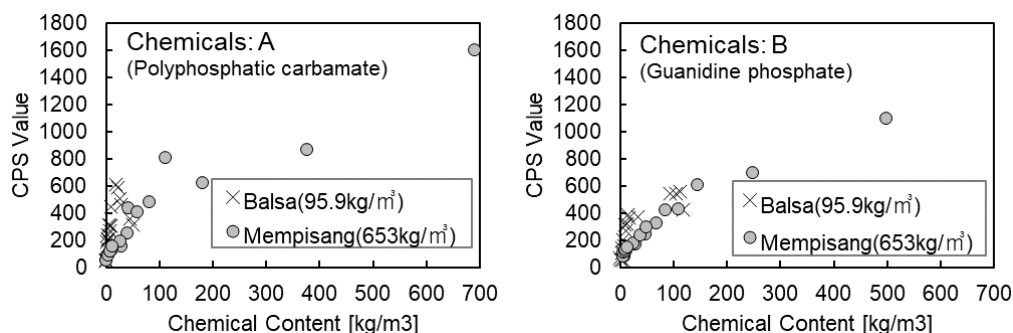


Fig. 2.4-11 Relationship between the content of chemicals and the CPS values

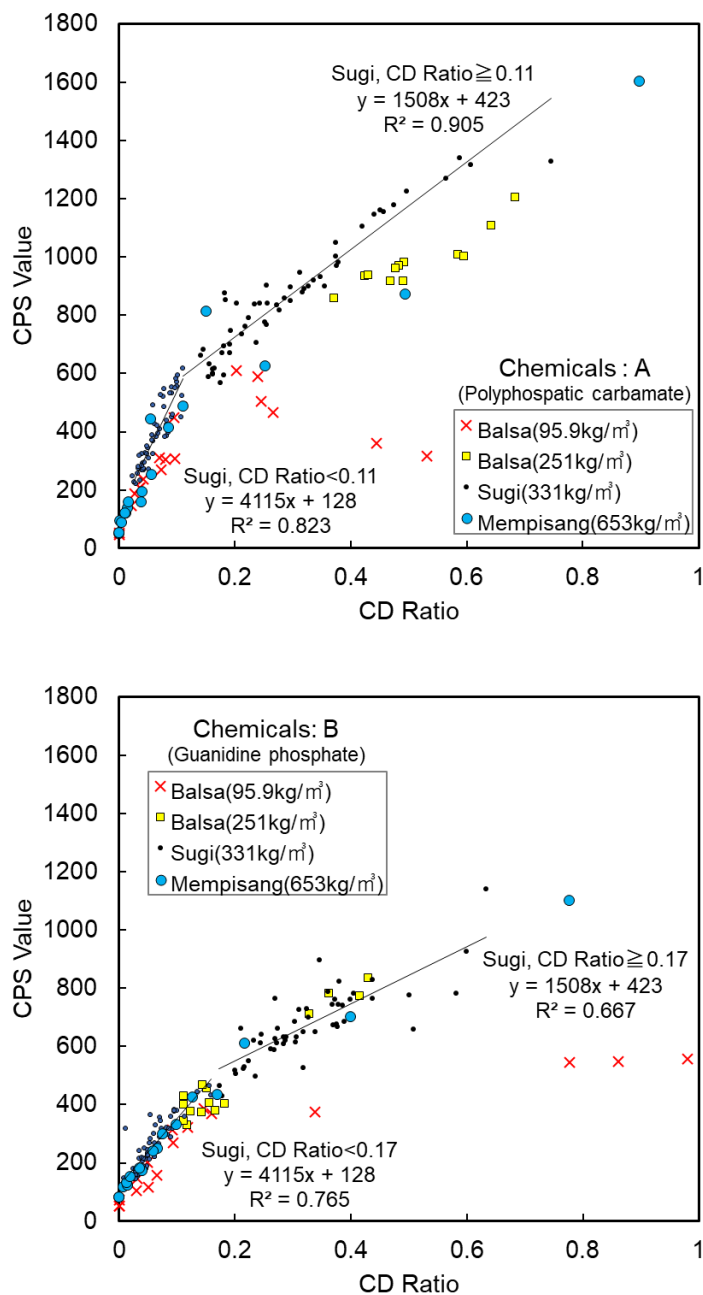


Fig. 2.4-12 Relationship between CD Ratio and CPS values.

Horizontal axes show the ratio indicating solid density of fire-retardant chemicals to wood density (referred to as CD Ratio), and vertical axes show the CPS values. Wood density seems proportionately decrease the CPS values as long as the wood density is greater than 250kg/m³.

(4) スギに対する蛍光 X 線分析の適用可能性

前項(3)にて導出された回帰式を薬剤量について解き、2.4.3(3)で調製した全ての難燃処理スギサンプルに対して適用した。Fig. 2.4-13 は 5(R)×5(T)mm 毎に CPS 値の平均値と基材密度を代入して薬剤量を推定した結果である。グラフの横軸は溶脱法により分析した薬剤量を、グラフの縦軸は蛍光 X 線分析から上記回帰式により推定される薬剤量を示す。また、前項(3)における低域の回帰式から推定した結果は塗りつぶしのプロット、高域の回帰式から推定した結果は白抜きのもので示してある。

推定結果のばらつきについて注目すると、低域における標準偏差は 9.53kg/m³(辺材、薬剤 A)、17.1 kg/m³(心材、薬剤 A)、10.1 kg/m³(辺材、薬剤 B)、14.2kg/m³(心材、薬剤 B)、高域における標準偏差は 15.9kg/m³(辺材、薬剤 A)、26.1 kg/m³(心材、薬剤 A)、22.5kg/m³(辺材、薬剤 B)、30.2kg/m³(心材、薬剤 B)となり、2.4.5(2)の相対標準偏差の傾向とは異なっており、高域での誤差が低減されなくなっている。このようなばらつきには早晚材間での微細な薬剤分布が影響していると考えられる。

次に、検量線から推定した薬剤量と実際の薬剤量の誤差に関して、サンプルの条件ごとのプロット群から導いた回帰式との差を考察する。算出された標準誤差は最大でも低域側で 0.93kg/m³(心材、薬剤 A)、高域側で 3.1kg/m³(心材、薬剤 B)にとどまり、サンプルの条件が異なっても高い一般性を示した。心材サンプルの実測値が高くなる傾向が認められるが、ずれの幅が 10kg/m³ に満たないことを考えると、基材自体に含まれていた抽出成分の影響であろう。

以上のように、木材試料に対する蛍光 X 線分析の結果には計測値そのもののばらつきには起因しないと考えられる誤差要因が内包されていることが分かったが、基材密度が低い場合には高レンジでの感度が著しく低下する場合があったことも考えると、スギに対する蛍光 X 線分析の適用性はそれほど低いものではないといえよう。

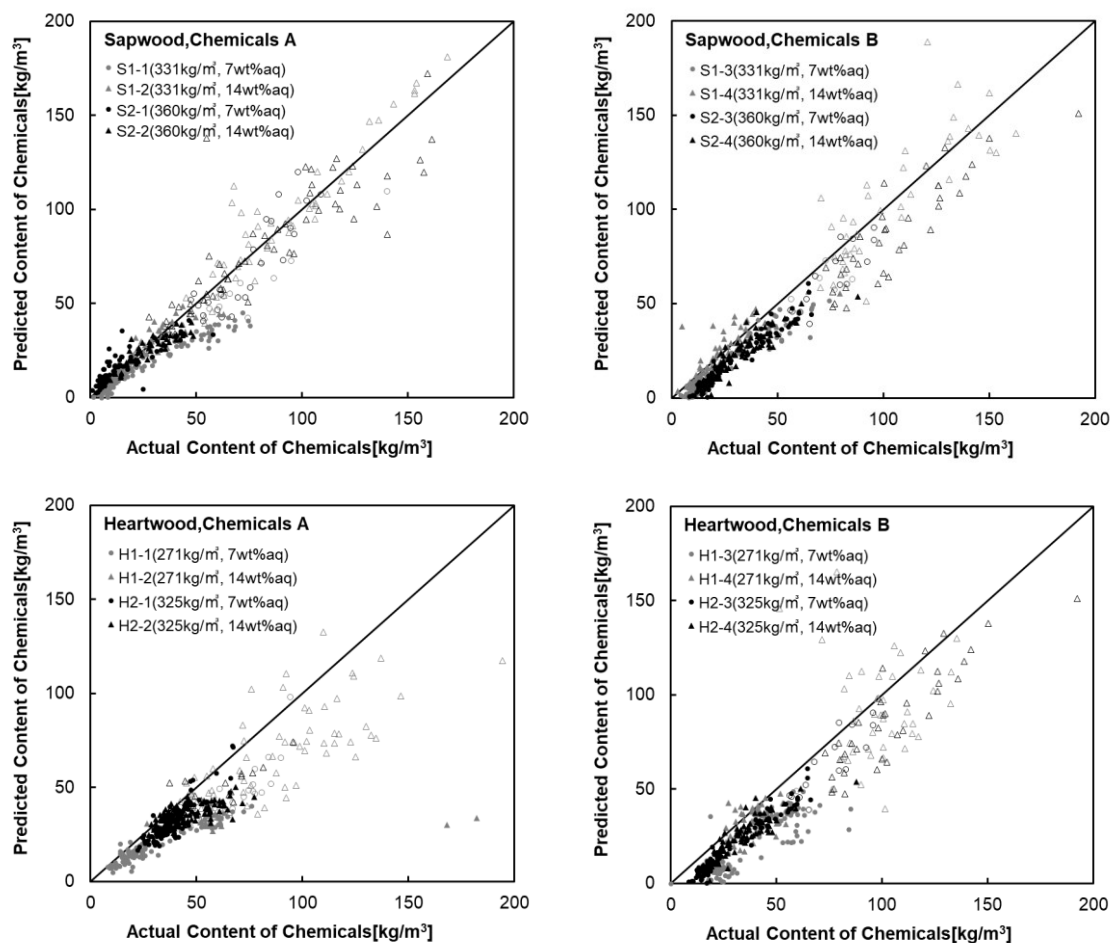


Fig. 2.4-13 Comparison of chemical content by actual weight and those predicted from X-ray fluorescent analysis.

Solid figures show the prediction using lower calibration curve shown in Fig. 5, and open figures are from higher calibration curve.

2.5 カラーマッピング画像の解像度の検討

2.5.1 実験方法

(1) 試験片

心辺材の両方を含むスギ 60(L)×25(R)×120 (T) mm に、ポリリン酸カルバメート系難燃薬剤の 7.0 wt%水溶液および 14 wt%水溶液を減圧加圧注入したものをそれぞれ用意した。注入条件と乾燥養生方法は 2.1.1 と同様である。乾燥後、繊維方向中央から薄切り 4.2(L)×25(R)×120(T) mm を切り出したものを試験片とし、木口面を分析に供した。

(2) 分析条件

Table 2.5-1 の 1-a~1-c に分析条件を示す。1 画素あたりのピクセルサイズは 0.25、0.5、1.0 mm 角の 3 通り、コリメーターサイズは 0.5、1.2 mm 角の 2 通りを選定し、得られたマッピング画像の解像度の検討を行った。

Table 2.5-1 Measurement conditions of X-ray fluorescent analyses

No.	Tube voltage [kV]	Tube current [μA]	Pixel size [mm]	Collimator size [mm]	Dwell time [ms]	Scan speed [mm ² /sec]
1-a	15	1000	0.25	0.5	20	3.1
1-b	15	1000	0.5	0.5	20	12.5
1-c	15	1000	1.0	1.2	20	50.0

2.5.2 結果と考察

Fig. 2.5-1-a~c に、ピクセルサイズを 0.25、0.5、1.0 mm として分析した場合それぞれのリン元素マッピング像を示す。また、Fig.4-d に、分析に供した試験片のマッピング領域を示した光学像を示す。いずれも同一の試験片を分析したものであり、上段が 14 wt%処理材の、下段が 7.0 wt%処理材の像となっている。

ピクセルサイズ 0.25 mm の Fig. 2.5-1-a をみると、リン元素の CPS 値は試験片の外周部で高く、内側では低い傾向を示し、なおかつ成長輪に沿って CPS 値に大小が表われていることが分かる。Fig. 2.5-1-e には、Fig. 2.5-1-a 中に黄色の枠で示した領域の R 方向のラインプロファイルを示し、年輪界の位置を同グラフ上にプロットした。Fig. 2.5-1-e から、CPS 値は早材部において高いことが分かる。Harada らはポリリン酸カルバメートを主成分とした薬剤を注入した難燃処理スギを解析した際、難燃薬剤が晩材よりも早材に多く分布することを報告しており¹²、本研究においても同様の傾向と考えられるが、このような微小領域での薬剤量分布を検討するには、基材密度の影響など更なる検証が必要と考えられる。

ピクセルサイズ 0.5 mm の Fig. 2.5-1-b を見ると Fig. 2.5-1-a と比べて解像度が粗くなるものの、早晩材の識別は依然として可能なことが分かる。ピクセルサイズをさらに大きな

1.0 mm とした Fig. 2.5-1-c を見ると、画質が粗くなっているため、早晚材を識別して CPS 値の大小と関連づけることは難しい。また、計測時間は当然ピクセルサイズが大きいほど短くなり、ピクセルサイズ 0.25 mm の場合は 1.0 mm の場合の 16 倍の時間が掛かる。

マッピングを行う上で、どの程度の解像度が必要か、という点は分析の目的によって異なり、例えばラミナ内の大まかな薬剤分布が分かれば良い、といった場合は更に大きなピクセルサイズでも傾向を把握することは可能であろう。逆に、例えば木材組織内での薬剤浸潤や溶脱のメカニズムの検討を目的に早晚材等の組織構造と薬剤分布を関連付けて検討するような場合は、ピクセルサイズを 0.5 mm 以下に設定することが望ましいと言える。

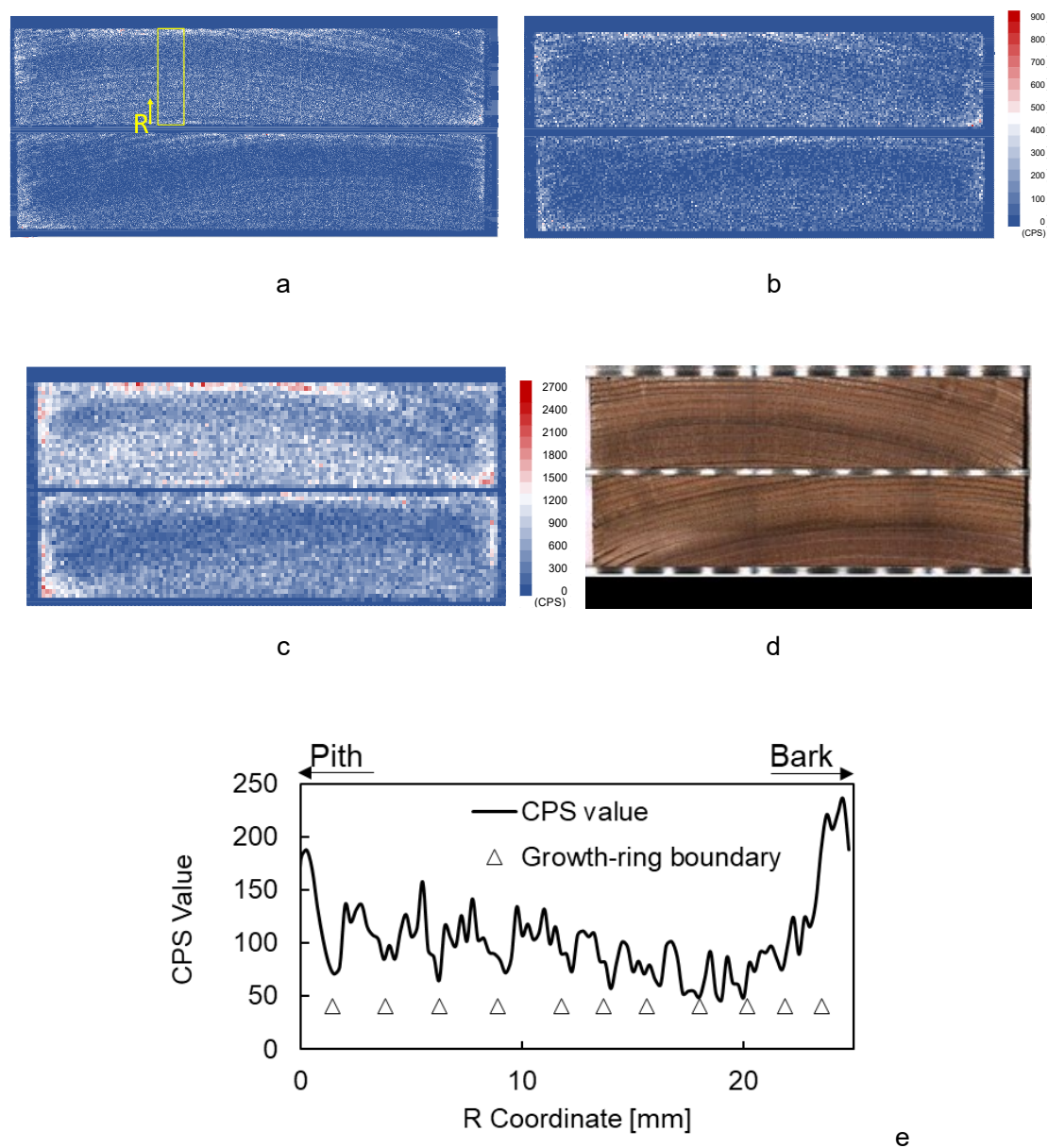


Fig. 2.5-1 X-ray fluorescent analysis and visual images (RT Plane)

The measurement conditions are listed in Table 1, from 1-a to 1-c. In each image, the sample has been processed in solutions with a concentration of 14, 7 wt%, in order.

- a. P-K α mapping image (1px=0.25 mm)
- b. P-K α mapping image (1px=0.5 mm)
- c. P-K α mapping image (1px=1.0 mm)
- d. visual image
- e. line profile of area in fig.4-a highlighted with a yellow rectangle. Higher CPS values are observed in earlywood.

2.6 計測条件ごとのマッピング出力値と薬剤量の関係の検討

2.6.1 実験方法

(1) 試験片

2.5.1(1)で示した方法に沿って作製した新たな試験片を用意し、分析に供した。

(2) 蛍光 X 線分析

試験片は位置合わせを正確に行うために、Fig. 2.4-2 に示すステンレス製治具を用いて固定した。計測結果は 1 点ごとのスペクトルデータの集合として得られ、本装置の制御ソフトにより任意の元素のマッピングデータを CSV ファイルとして書き出した。リン元素のマッピングデータ上での試験片外縁位置は、Fe 元素のマッピングデータより上記ステンレス製治具の位置を判別することで特定した。Table 2.6-1 に計測条件の一覧を示す。計測条件はコリメーターサイズ、ドウェルタイムの各条件が計測精度に及ぼす影響の検討を目的とした 5 条件 (2-a~2-e) とした。

Table 2.6-1 Measurement condition of X-ray fluorescent analysis

No.	Tube voltage [kV]	Tube current [μA]	Pixel size [mm]	Collimator size [mm]	Dwell time [ms]	Scan speed [mm ² /sec]
2-a	15	1000	0.5	0.5	20	12.5
2-b	15	1000	0.5	0.5	50	5.0
2-c	15	1000	0.5	0.5	100	2.5
2-d	15	1000	0.5	1.2	20	12.5
2-e	15	1000	0.5	3.0	20	12.5

(3) 溶脱法による薬剤量計測

蛍光 X 線分析を実施した後の試験片を 5 mm 角の小片に分割し、それぞれの小片について溶脱法⁵⁾により薬剤量を求めた。すなわち、それぞれの小片について、薬剤が含まれた状態と、水浸漬にて薬剤を完全に溶脱させた状態の絶乾密度を計測し、その差分より小片ごとの薬剤量[kg/m³]を求めた。試験片の分割は分割位置にノミの刃を当て、ハンマーで打突することで行い、分割位置の誤差は各辺±0.2 mm 程度に納まった。

2.6.2 結果と考察

2.4.5(3)から、CPS 値から薬剤量への換算には基材密度分布による補正が必要であることが示唆されたが、実際の計測で基材の微細な密度分布を把握することは困難である。そこで、本検討ではある程度の範囲において CPS 値が薬剤量に換算できるかという視点に重点を置き、CPS 値と実際の薬剤量の関係を考察する。そこで、定量分析における検量線法に準じて、各計測条件でのマッピングから得られた CPS 値とマッピング後に試験片を小割して溶脱法⁷により求めた薬剤量とを比較し、難燃処理材中の難燃薬剤の定量分析が蛍光 X 線分析によって可能かどうか、計測条件により CPS 値と実際の薬剤量との分散がどのように変わるかを検討した。

まず、同一試験片の同一領域を対象に、Table 2.6-1 の 2-a から 2-e に示した分析条件毎に、リン元素のマッピングを行った。続いて、マッピング領域 (25(R)×120(T) mm) を 5 mm 角のマトリックスに分割し、各 5 mm 四方から検出されたリン元素の平均 CPS 値を算出して、Fig. 2.6-1 の縦軸に分析条件別にプロットした。次に、マッピング後の試験片を上記で示した 5 mm 角に小割して、溶脱法により実際の薬剤量を計測した。そののち、実際の薬剤量を体積当たりの固形分量として、Fig. 2.6-1 の横軸に分析条件別にプロットした。これらから、Fig. 2.6-1, 2.4.5(3)を基に、分析条件を考慮しながら、実際の薬剤量と CPS 値との関係性、難燃薬剤の定量分析の可能性を検討した。

分析条件 (2-a から 2-e) に関わらず、薬剤量が 100 kg/m³ 程度まで大きな傾きを、それ以降は緩やかな傾きを示し、2 本の直線あるいは累乗根状の曲線で近似できる傾向を示した。薬剤量の少ない、すなわち、原点付近のプロット群は 7.0 wt% で処理した試験片由来の結果で、もう片方のプロット群は 14 wt% で処理した試験片由来の結果である。これらから、薬剤量 100kg/m³ 付近を境に、プロットの傾きが異なる傾向が認められた。この理由として、細胞壁内の薬剤と仮道管内腔に析出した薬剤とでは、薬剤由来のリン元素の検出値が異なり、このことが異なった傾きになった一因と考えられる。また、薬剤が内腔に析出した場合も、その頻度や偏りによって検出値が異なる可能性がある。100kg/m³ 近傍という薬剤量が、内腔に析出し始める領域なのかどうかも含め、上記の可能性を検証する必要がある。今後、電子顕微鏡などを用いた観察や解析を行う予定である。しかしながら、少なくとも CPS 値と薬剤量との間に 1 対 1 となる高い関係性が認められたということは、マッピングデータから薬剤量分布を把握できることを示している。言い換えれば、表面組成分析の結果が、ある程度の厚みをもつ木材試料中の薬剤量を一定程度反映し得ることを示している。

次に、蛍光 X 線分析条件の違いが、その出力値に対してどのように影響するかを検討した。まず、ドゥエルタイムのみの分析条件が異なる 2-a、2-b、2-c を比較すると、ドゥエルタイムが大きいほどプロットのばらつきが小さくなる傾向が見られるが、最もドゥエルタイムの小さい 20 ms であってもある程度線状にプロットはまとまっており、ドゥエルタイ

ムが短くなっても劇的にばらつきが大きくなるわけではないことが分かった。

次に、コリメーターサイズを変化させて分析した 2-a、2-d、2-e を比較すると、コリメーターサイズをピクセルサイズより幾分大きく設定した 2-d の条件において高い決定係数が得られた。コリメーターサイズを大きくすることで得られる CPS 値が大きくなり、ドゥエルタイムの短さを補う効果があるが、逆に大きくし過ぎると本来のピクセルサイズ外からの X 線の影響が過大となりばらつきを増加させるものと考えられる。2-d の条件であれば、前者の効果の方が後者の影響を上回ることが分かった。コリメーターサイズをピクセルサイズより多少大きくしてもばらつきを増加しないのは、X 線の強度が視野の周縁部で減衰すること²¹が要因として考えられる。

以上の結果をまとめると、スギ難燃処理材の木口断面に対して薬剤分布のマッピングを行う際、ドゥエルタイムおよびコリメーター寸法を大きくするという、1 点あたりのカウント数を確保する幾つかの操作によりばらつきを低減させるのが精度向上の方策であることが分かった。ただし、ドゥエルタイムに関してはある程度以上からばらつきに対する影響が小さくなること、コリメーターサイズを必要以上に増大させるとばらつきが大きくなることが分かった。2.3 での画像解像度での検証も考慮すると、早晚材での違いなどを検討しながら比較的高い精度で、かつ短い時間で効率的にリン系薬剤のマッピングを実施するような場合は、2-d に類する条件、即ちピクセルサイズ 0.5 mm、コリメーターサイズ 1.2 mm、ドゥエルタイム 20 ms 程度とした条件が測定時間の短さといった実用上の観点からも妥当であると考えられる。本条件において、導出された回帰式に対する標準偏差は処理濃度 14% の試験片について 52.5CPS、処理濃度 7% の試験片について 40.5CPS と算出された。

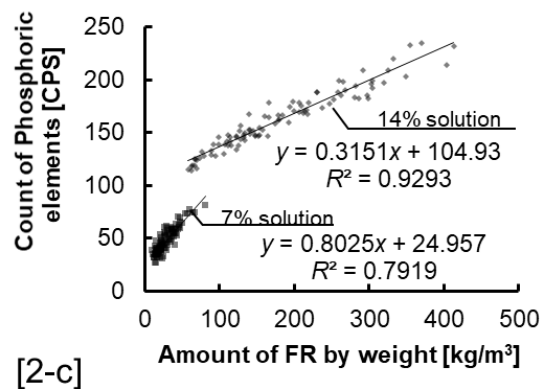
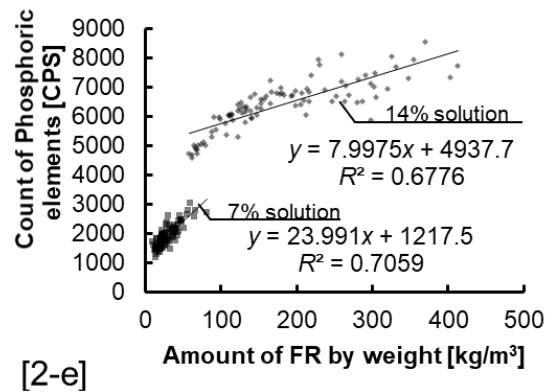
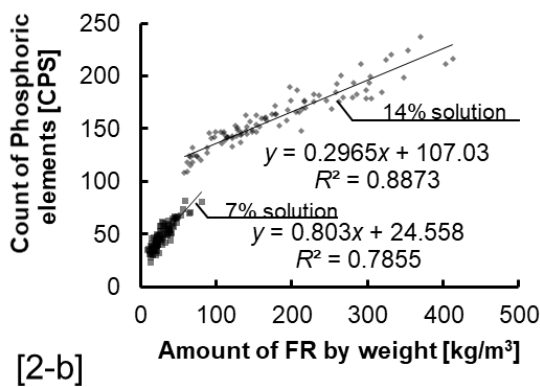
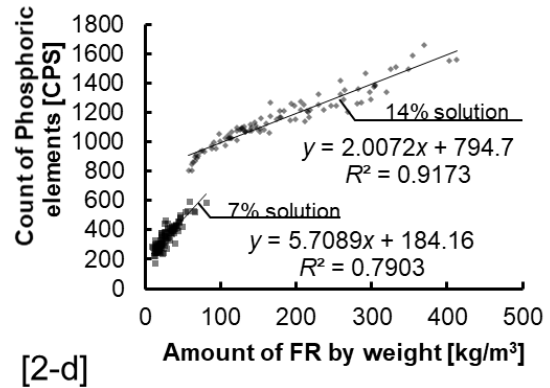
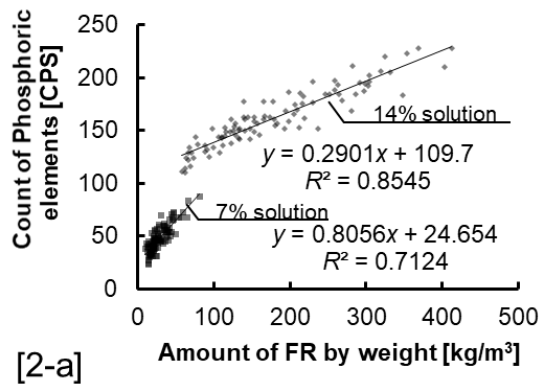


Fig. 2.6-1 The relationship between chemical content and count of phosphoric elements in X-ray fluorescent analyses under the conditions listed in Table 2.6-1, from 2-a to 2-e.

The horizontal axes show the average count of phosphoric elements inside a 5 mm square grid, and the vertical axes show the chemical content as measured by the water leaching test procedure. The coefficient of determination increases when the dwell time is increased (see 2-a, b and c), or collimator size is optimized (see 2-a, d and e).

2.7 まとめ

検量線法に準じた手順により、木材中に含浸した難燃薬剤の量を蛍光 X 線分析によって推定する可能性を検証した。バルサ、メンピサン材をリン酸系薬剤 2 種で難燃処理して調製した均一試料を用いて蛍光 X 線分析と溶脱法の比較を行い、相対標準偏差を算出した結果、複数ピクセルの平均を取ることで計測値の再現性が確保できることが確認できた。これら 2 樹種を比較した結果、基材密度が高いメンピサンでは元素のカウント数が低い傾向であったため、基材密度と薬剤量の比に関する回帰式を導出したところ、基材密度 250kg/m^3 以上の材に対しては 1 つの回帰式で表現することが出来た一方で、密度 100kg/m^3 の材では高域での感度が著しく低下した。また、いずれの材種においても、基材に対して薬剤が重量比で 15%を超えた付近で折れ曲がる検量線にて表現されることが分かった。密度によって検量線の傾向が異なること、検量線が直線的に表現されないことは、特に微細な薬剤分布にフォーカスするほど、薬剤の定量が困難である可能性が示された。また、ミリオーダーで見た時には、スギなど早晚材間の基材密度の変動が大きい樹種において、上記の要因によって計測値の見かけのばらつきの要因であることが示唆されたといえる。

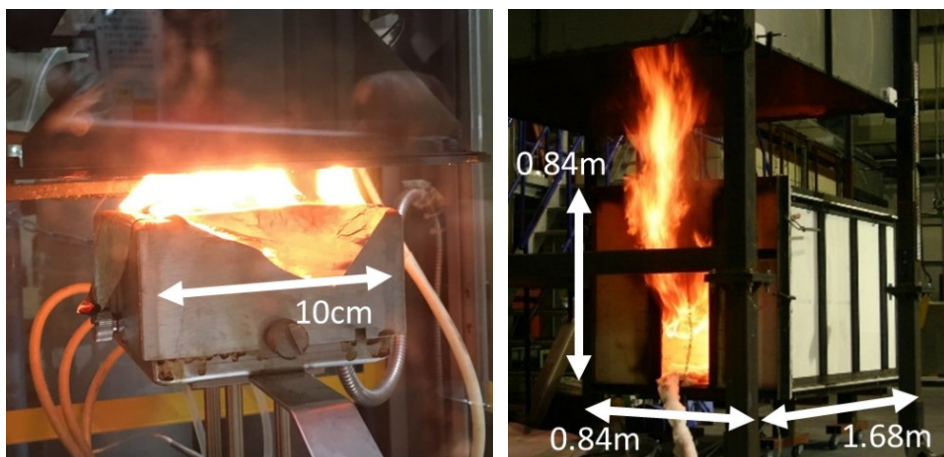
次に、対象をスギに絞り、ドゥエルタイムおよびコリメーターサイズを異ならせたマッピングを行い、計測条件が検量線の誤差範囲や直線性におよぼす影響を検討した。上記と異なる複数の条件においても、検量線が 2 直線状で表現される傾向に変わりはなかったことから、このような結果は微細な薬剤分布に起因するものと考えられた。但し、各部の基材密度を反映しない状態でも、計測値のばらつきは $\pm 40 \sim 50\text{CPS}$ 程度であることが分かった。以上の誤差要因は、分析の目的次第では問題になり得るが、次章以降のミリオーダーの検討においては、こうした誤差要因は誤った推定結果を導くほどではなく、単にばらつきを増加させる要因と捉えることが出来ると考えられる。

文 献

- 1 菊地伸一, 前田恵史: 木材の発熱速度におよぼす難燃剤の効果, 木材学会誌 **53**(5), 276-282 (2007).
- 2 Harada, T. , Uesugi, S. , Taniuchi, H. : Evaluation of Fire-retardant Wood Treated with Poly-phosphatic Carbamate using a Cone Calorimeter, *Forest Products Journal*, **53**, pp, 81-85 (2003).
- 3 河原崎政行, 菊地伸一, 田坂茂樹, 土橋常登, 鈴木秀和: 長尺の薬剤処理木材における材内の薬剤分布と模型箱試験による防火性能の評価, 北海道立総合研究機構林産試験報 **541**, 17-24 (2012).
- 4 日本木材防腐工業組合: 平成 22 年度地域材利用加速化緊急対策支援事業 建築物の耐火性能試験報告書 (2011).
- 5 上川大輔: 難燃薬剤処理木材の溶脱法による薬剤固形成分量の計測手法に関する研究, 木材保存 **39**(2), 78-85 (2013).
- 6 上川大輔, 原田寿郎, 服部順昭, 安藤恵介: 溶脱法による難燃処理木材中の薬剤量分布測定, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 3075 (2014).
- 7 上川大輔: 難燃薬剤処理木材中の薬剤分布の分析, 木材保存 **44**(3), 158-159 (2018).
- 8 渥美清隆, 田中孝, 山田雅章: 実大材スギに含まれた各種難燃薬剤の乾燥過程における挙動の X 線観察, 第 66 回日本木材学会大会研究発表要旨集, N28-P-18 (2016).
- 9 渥美清隆, 田中 孝, 山田雅章: マイクロフォーカス X 線 CT 撮影によるスギに含まれた各種難燃薬剤の薬剤分布観察, 第 67 回日本木材学会大会研究発表要旨集, N18-P2-30 (2017).
- 10 岡村博幸, 朝倉良平, 竹内和敏, 糸平圭一, 長谷川益己: マイクロフォーカス X 線 CT 装置による不燃薬剤の材内分布把握の試み, 第 65 回日本木材学会大会研究発表要旨集, N17-P-F15 (2015).
- 11 岡村博幸, 朝倉良平, 竹内和敏, 山田圭一, 長谷川益己: 不燃薬剤の材内分布に関する研究(第 2 報)ーマイクロフォーカス X 線 CT 装置を用いた非破壊的評価, 福岡県工業技術センター研究報告 **26**, 13-16 (2016).
- 12 Harada, T. , Matsunaga, H. , Kataoka, Y. , Kiguchi, M. , Matsumura, J. : Weatherability and combustibility of fire-retardant-impregnated wood after accelerated weathering tests, *Journal of Wood Science* **55**(5), 359-366 (2009),
- 13 古野毅, 後藤崇志, 加藤定信: ケイ酸-ホウ素化合物系による木材無機質複合体の EPMA 観察と酸素指数法による難燃性評価, 材料 **50**, 383-390 (2001).
- 14 安藤恵介, 服部順昭, 松原独歩, 宮林正幸, 上川大輔, 原田寿郎: 蛍光 X 線観察による難燃処理ラミナ中の薬剤分布状況について, 日本木材加工技術協会第 35 回年次大

-
- 会講演要旨集, 72-73 (2017).
- 15 上川大輔, 高瀬棕, 松永浩史: 難燃処理木材中の薬剤分布の偏りの発生要因について, 日本木材保存協会年次大会研究発表論文集 **34**, 122-123 (2018).
- 16 R Jenkins, R W Gould and D Gedcke: “Quantitative X-ray spectrometry” 2nd edition, Marcel Dekker, New York (1995).
- 17 R Tertian and F Claisse: “Principles of quantitative X-ray fluorescence analysis”, Wiley, New York (1982).
- 18 R E Van Grieken and A A Markowicz: “Handbook of X-ray spectrometry” 2nd edition, Marcel Dekker, New York, Basel (2002).
- 19 北村恭朗: 検量線に関わる理論と評価方法について, 農薬調査研究報告 **7**, 101-106, (2015).
- 20 上本道久: 検出限界と定量下限の考え方, ぶんせき, 216-221 (2010),
- 21 土谷康夫: 電子プローブ・マイクロアナライザー, 日本表面科学会編, 丸善, 東京 (1998). p. 32

第 3 章 難燃処理木材の板厚方向の薬剤分布と火災安全性



Two burning test procedures referred in this chapter
(Left: cone calorimeter, right: model box)

3.1	目的.....	3-3
3.2	燃焼発熱性に対する薬剤分布の影響	3-3
3.2.1	実験方法.....	3-3
(1)	実験条件.....	3-3
(2)	試験体	3-3
3.2.2	実験結果.....	3-7
(1)	発熱速度・質量の推移および目視観察記録.....	3-7
(2)	防火材料としての区分.....	3-11
3.2.3	考察.....	3-12
(1)	発熱のピーク値に対する薬剤の量・偏在の影響.....	3-12
(2)	発炎燃焼抑制に必要な薬剤量.....	3-12
(3)	総発熱量に対する薬剤の量・偏在の影響	3-13
3.3	模型箱試験による燃え広がりの評価	3-16
3.3.1	目的.....	3-16
3.3.2	実験方法.....	3-16
(1)	実験装置および試験体.....	3-16
(2)	火源.....	3-20
(3)	実験継続時間	3-20
(4)	発熱速度の計測.....	3-20
(5)	温度計測・焼損状況の記録	3-20
(6)	試験体の調製方法	3-22
(7)	試験体の諸元	3-22
(8)	蛍光 X 線分析による挽板の全数確認と割り付けの検討.....	3-24
3.3.3	結果.....	3-27
(1)	無処理木材	3-27
(2)	難燃処理仕様	3-29
3.3.4	考察.....	3-36
(1)	室温度に対する薬剤の偏在の影響	3-36
(2)	発熱速度と薬剤分布の関係	3-36
(3)	防火性能評価に対する試験法の影響.....	3-39
3.3.5	まとめ	3-41

3.1 目的

特殊建築物等の内装を木材で仕上げるには難燃処理を施すことを求められる場合が多いが、難燃処理木材の防火性能は、吸放湿による薬剤の材表への析出（白華）等に起因して製造時と異なる懸念がある¹。また、平成 23 年には認定仕様と流通する製品の不適合が指摘され²、製造における品質管理も問題となっている。このような防火性能の変動は、いずれも材内において難燃薬剤が不均一に分布することに起因すると考えられる。

本章では、人為的に薬剤分布を制御して調製した試験体を、2 章で述べた分析法により全数検査した上で、燃焼性状との対応関係を明らかにすることで、薬剤分布の不均一性や白華等が材料としての火災安全性にどんな影響を及ぼしうるか検討する。3.2 節では板厚方向の薬剤量の不均一性と燃焼性状との基礎的關係を解明する目的でコーンカロリメーターを用いた加熱実験を実施し、3.3 節ではより実火災に近い実験条件となる模型箱試験により、薬剤が均一に材内に分布する場合と表面に集積した場合の燃え広がり进行比较する。

3.2 燃焼発熱性に対する薬剤分布の影響

3.2.1 実験方法

(1) 実験条件

森林総合研究所内のコーンカロリメーター(東洋精機製作所製 Cone Calorimeter III)を用いた。一般的に実施される発熱性試験において、材内に薬剤の偏在を生じた難燃処理木材がどのように評価されるか把握するために、加熱条件は性能評価機関が定める防耐火性能試験・評価業務方法書³（以下、業務方法書）に準じて、加熱強度 50kW/m^2 、電子スパークによる口火ありの条件下で実施した。加熱条件は水平上向き、加熱時間は厚 18mm の板材の発炎燃焼が終了するまでを目安に 20 分とし、発熱速度 $[\text{kW/m}^2]$ および質量 $[\text{g}]$ を計測した。

(2) 試験体

一般に難燃処理木材は、木材に所定の薬剤の水溶液を加圧注入したのち、 60°C 程度に昇温して乾燥させるという工程で製造される。この乾燥工程において、水分の移動に伴って薬剤が材表方向に移動している可能性があり、たとえ十分に薬剤の水溶液が浸透した状態からでも、難燃薬剤の分布は不均一になる⁴ことが報告されている。ここでは、次のように、一般的な難燃処理木材より薬剤が均一に分布するものと、極端に不均一なものを作り分ける。基材の樹種はスギ辺材(基材密度 $360 \pm 20\text{kg/m}^3$)とした。

- ・薬剤が均一に分布した難燃処理材 [U 系列]

乾燥工程で薬剤分布が不均一になるのであれば、難燃薬剤の水に対する溶解度が低い状態で乾燥を行えば薬剤が比較的、均一に分布した処理材が作れるとも考えられる。そこで、U については、注入後に通常の蒸気式乾燥ではなく減圧乾燥を行った。乾燥条件は 28℃68%RH で 1 週間の風乾を行ったのち 0.26atm, 35℃で 1 ヶ月の減圧乾燥を行い、実験まで常圧、23℃50%RH の恒温室で乾燥養生を継続した。

- ・難燃薬剤が表面に集積した難燃処理材 [S 系列]、裏面に集積した難燃処理材 [B 系列]

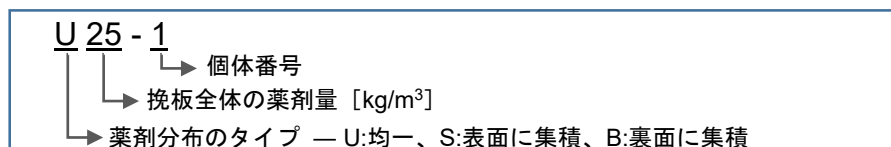
通常の乾燥工程においては、開放された板材の各表面付近に薬剤が集積し、内部に少ない傾向となる。また、屋内の使用環境で白華が生じた場合には乾湿が表面から繰り返し作用する結果、屋内側表面に薬剤が多く、密閉された裏面に薬剤が少ない状態になると考えられる。以上を危険側で評価するために、板材の片面に薬剤を集積させた試験体を調製した。これは、乾燥工程において Fig. 3.2-1 のように注入後の板材を 2 枚、背合わせにして乾燥させることにより行った。

- ・無処理木材 [C 系列]

対照として、無処理のスギ材 2 体を実験に供した。

そのほかの諸条件は以下の通りである。注入時の挽板サイズは 300(L)×18(R)×105(T)mm とした。これは、コーンカロリメーター用の試験体 (100(L)×100(T)mm) 2 体分と薬剤分布の検証用の薄切りサンプルおよび、木口方向への吸い出しの影響によって薬剤が偏在した箇所を切り落とすための余長の合計から定めた (Fig. 3.2-2)。

U 系列は、上記の要領により挽板 1 枚から採取した 2 体で N 数=2 を確保し、S 系列と B 系列は、同じ原板から採取した 2 体の加熱方向を逆とすることで分け、それぞれ N 数=1 とした。難燃薬剤は、流通する難燃処理木材に広く使用されるリン酸系薬剤であることと、薬剤単体で購入して注入工程の管理が可能であることを要件に、丸菱油化製 ノンネン W2-50 (主成分：カルバミルポリリン酸) を選定した。薬剤量は、注入時の薬液濃度で 4 段階に制御した。全試験体の諸元を Table 3.2-1 に示す。試験体番号は、以下に示すように試験体の系列を表すアルファベットと挽板全体の難燃薬剤量 (注入前後の重量変化より計測)、個体番号の組み合わせとなっている。



また、これら試験体の薬剤分布を事前評価するために、乾燥後の挽板の長手方向中央から採取した 4(L)×18(R)×105(T)mm の薄切りの板厚方向の断面を、2 章で述べた蛍光 X 線分析(X-ray fluorescent analysis)に供した。

分析結果を Fig. 3.2-3 に示し、板厚方向の分布を Fig. 3.2-4 に示す。なお、蛍光 X 線分析における相対標準偏差の影響を 10%以下とするには、本計測条件で得られたデータの場合は 16 ピクセル分の平均を取る必要があり、一つのピクセルが 0.5mm 角であるため、Fig. 3.2-4 のデータは幅 8mm (0.5mm×16px) の帯状の領域における厚み方向の薬剤量の変動を示している。いずれの系列においても、概ね意図した通りの薬剤分布に制御することが出来ているが、詳細にみると、薬液濃度の低いものについては、低温下で乾燥養生を行ってもなお、試験体の中心部の薬剤量が低い傾向も読み取れる。

Table 3.2-1 Specification list of specimens for cone calorimeter tests

No.	Concentration of Impregnated Solution [wt%]	Drying Condition and Shaving	Wood Density [kg/m ³]	Chemical Content after Shaving [kg/m ³]	Weight [g]	Dimentions [mm]		
						Lengthial	Radial	Tangential
C-1	-	-	266.2	-	51.8	99.3	17.9	99.4
C-2	-	-	329.7	-	64.1	99.5	18.0	99.6
U25-1	5.1	28°C60%RH/1week →35°C0.26atm/1month	362.6	27.6	75.5	100.0	17.6	100.1
U25-2			362.6	23.1	74.6	100.0	17.4	100.0
U55-1	9.4		362.8	69.6	83.1	100.2	17.7	100.1
U55-2			362.8	42.3	78.1	100.3	17.8	100.1
U97-1	15		359.7	107	89.3	100.0	17.6	100.0
U97-2			359.7	92.8	86.6	100.1	17.5	99.8
U143-1	21		358.3	186	103.1	99.9	17.8	99.8
U143-2			358.3	136	94.1	100.1	17.5	100.0
S15	5.1		364.3	18.1	74.1	100.8	17.5	99.6
B15			364.3	11.0	72.8	100.0	17.4	99.6
S40	9.4		359.0	42.9	77.5	100.0	17.7	99.6
B40			359.0	38.6	76.7	99.8	17.6	99.9
S77	15		361.0	76.7	84.0	100.7	17.7	100.0
B77			361.0	76.7	84.0	100.0	17.7	99.9
S113	21		359.5	111	89.9	100.0	17.7	99.9
B113			359.5	114	90.5	100.4	17.7	100.2

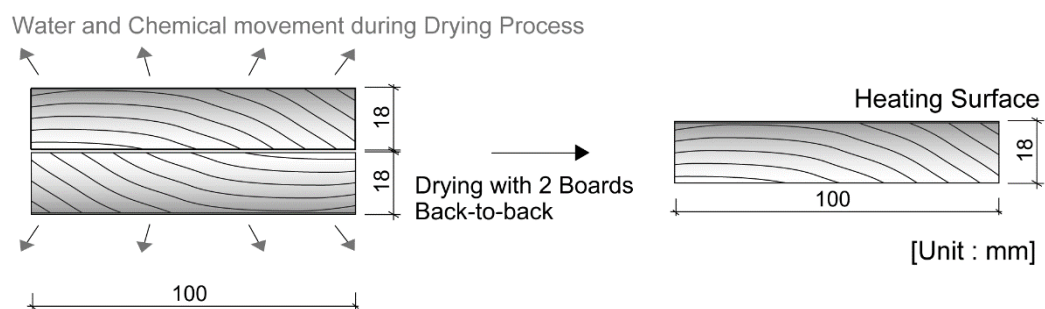


Fig. 3.2-1 Procedures for controlling chemical distribution

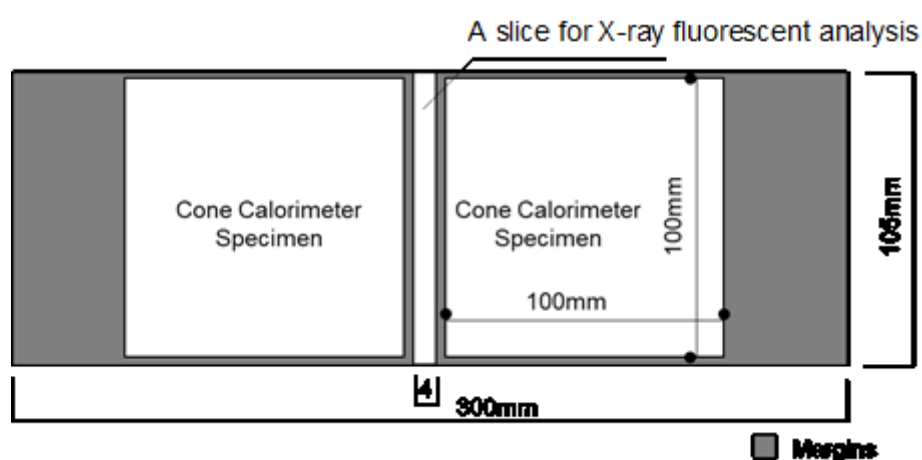


Fig. 3.2-2 Sampling procedures from treated wood

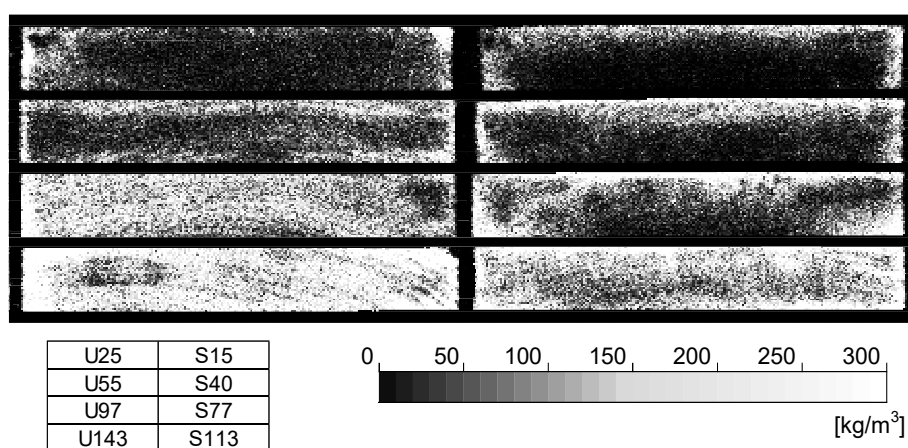


Fig. 3.2-3 Distribution of fire-retardant chemicals analyzed with X-ray fluorescent analyses

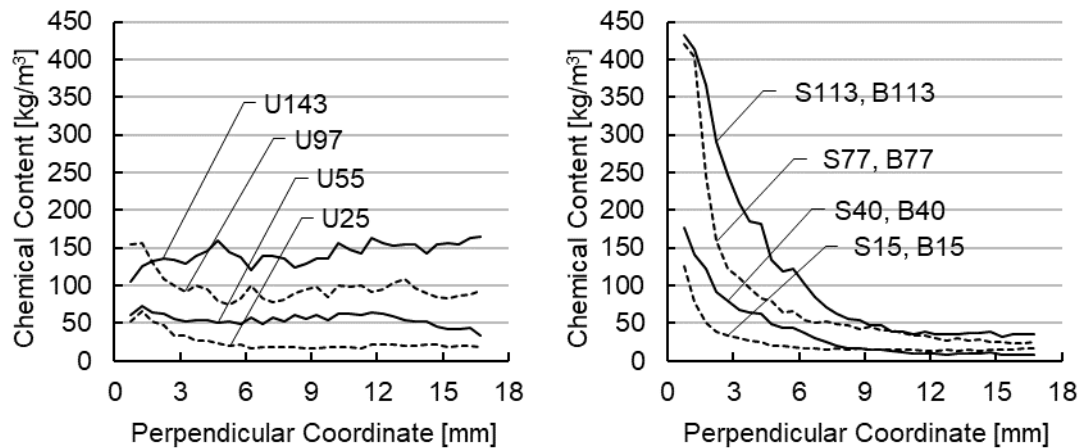


Fig. 3.2-4 Perpendicular profiles of chemical content

3.2.2 実験結果

(1) 発熱速度・質量の推移および目視観察記録

Fig. 3.2-5 に処理時の難燃薬剤の溶液濃度ごとの実験結果を示す。上から順に、発熱速度、積算発熱量、質量、質量減少速度、単位質量減少あたりの発熱量それぞれの時間推移を表しており、(a)は無処理の試験体、(b)は難燃薬剤溶液濃度 5.1wt% で処理したもの (c)は 9.4wt%、(d)は 15wt%、(e)は 21wt% 溶液で処理したものの結果である。各発熱速度の推移グラフ中には、発炎燃焼した期間を矢印にて記載している。

Fig. 3.2-5a に無処理 C の 2 体の実験結果を示す。C-1 は加熱開始 27 秒で着火し 684 秒 (11 分 24 秒) まで発炎燃焼した。C-2 は加熱開始 31 秒で着火し 822 秒 (13 分 42 秒) まで発炎燃焼した。

Fig. 3.2-5b に、もっとも濃度の低い 5.1wt% の薬液で処理した系列の結果例を示す。U25 については、材の表面および裏面の熱分解に伴う 2 回のピーク付近のみで発炎燃焼を生じ、それらの時間は、26～84 秒、594～756 秒 (9 分 54 秒～12 分 36 秒) であった。また S15 については 320～828 秒 (5 分 20 秒～13 分 48 秒)、B15 については 23～800 秒 (23 秒～13 分 20 秒) まで発炎燃焼し、いずれも薬剤量の少ない側が熱分解する時間帯においてピークを観測した。

Fig. 3.2-5c に、薬液濃度 9.4wt% で処理した系列の結果例を示す。U55 では発炎燃焼を生じず、S40 では 574～880 秒 (9 分 34 秒～14 分 40 秒)、B40 では 24～320 秒 (24 秒～5 分 20 秒) の間で発炎燃焼を生じた。

Fig. 3.2-5d に B77 では 26～114 秒まで発炎燃焼を生じた。U97、S77 および Fig. 3.2-5e に示す U143、S113、B113 は発炎燃焼を生じなかった。

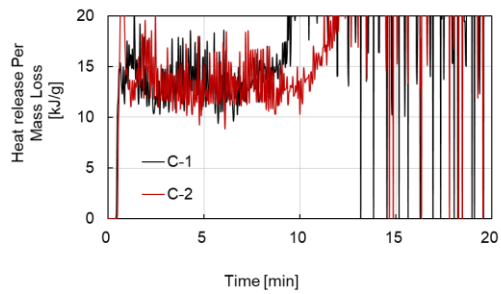
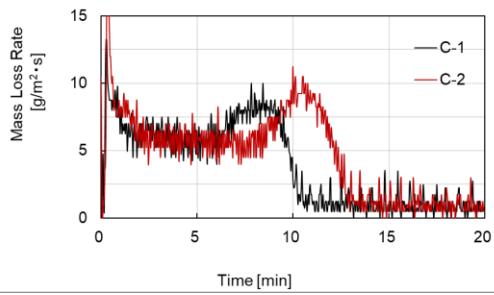
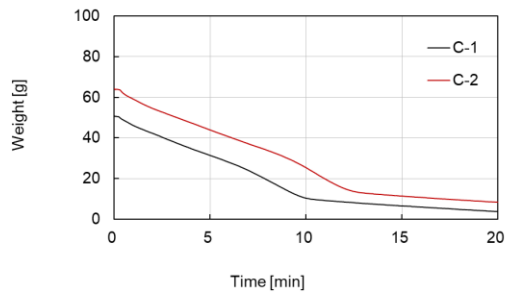
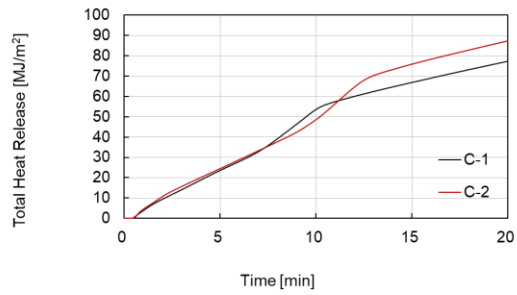
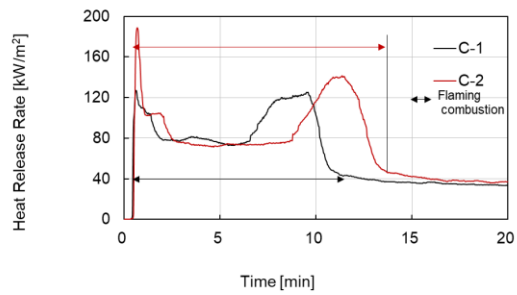


Fig. 3.2-5a

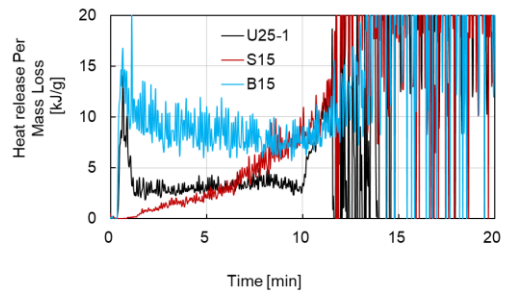
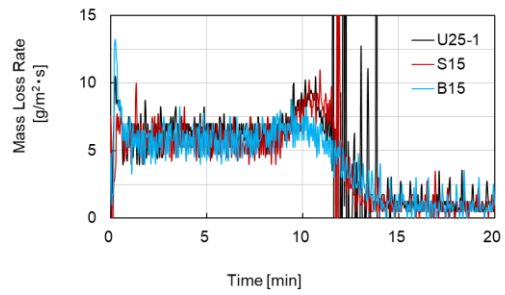
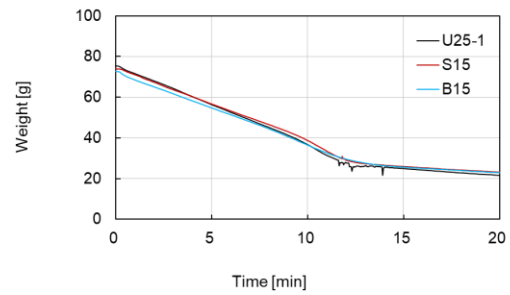
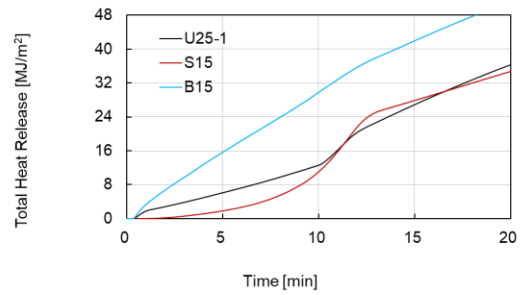
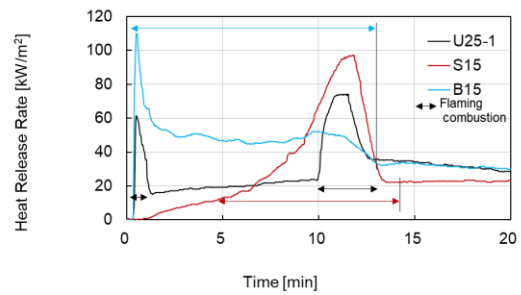


Fig. 3.2-5b

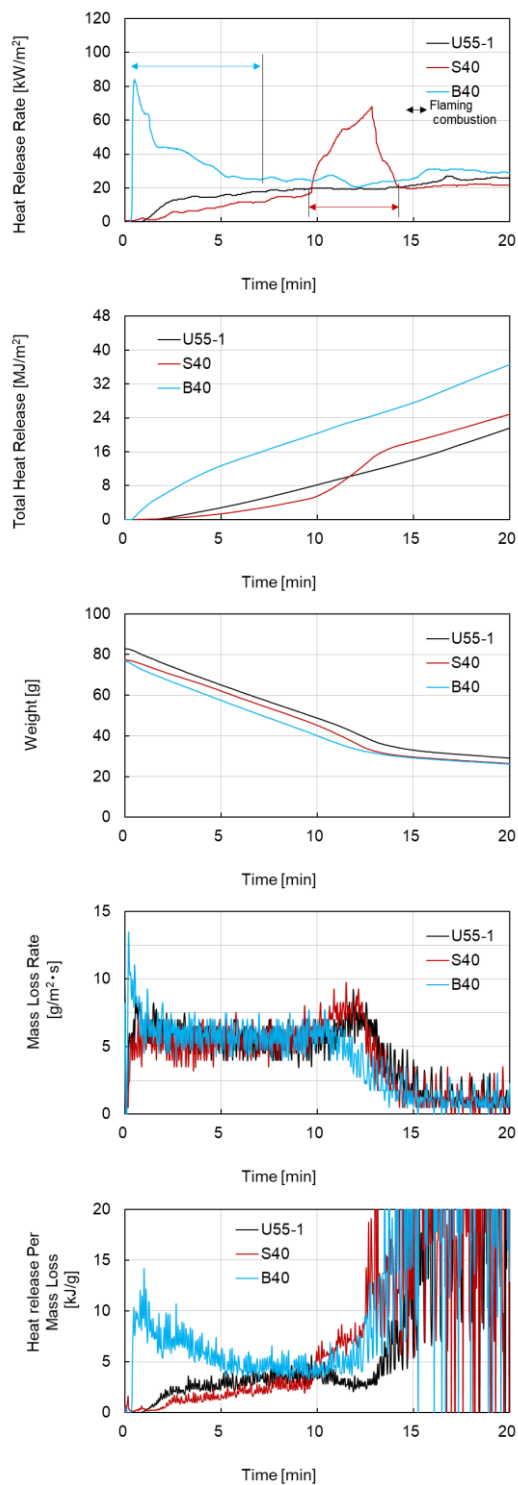


Fig. 3.2-5c

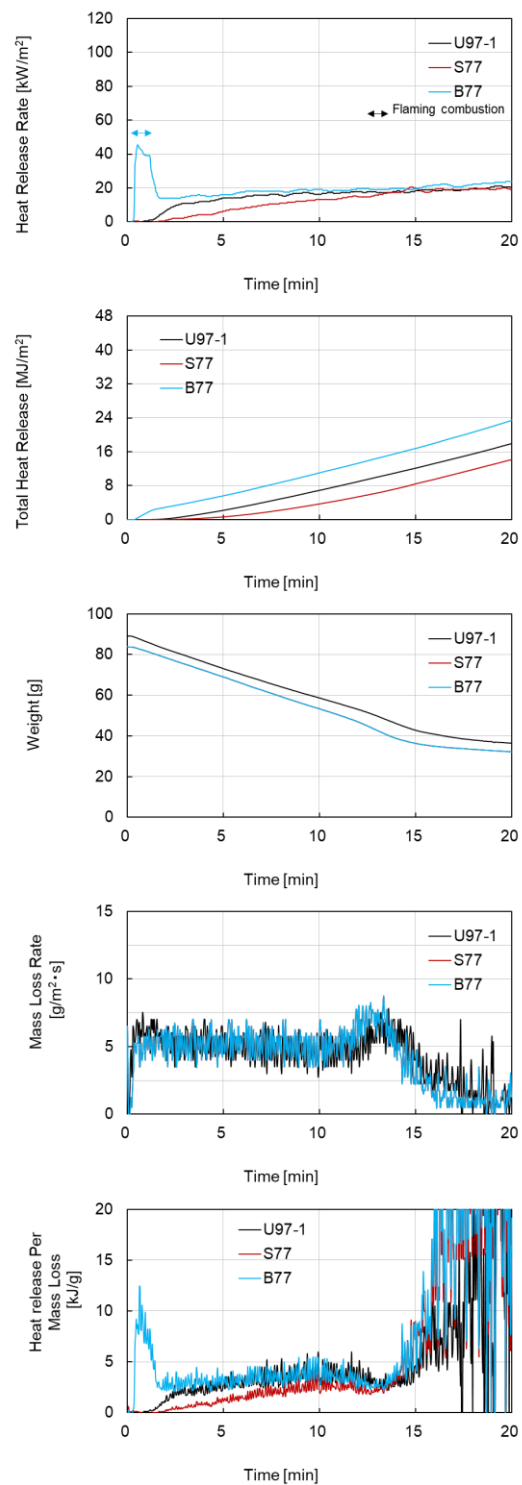


Fig. 3.2-5d

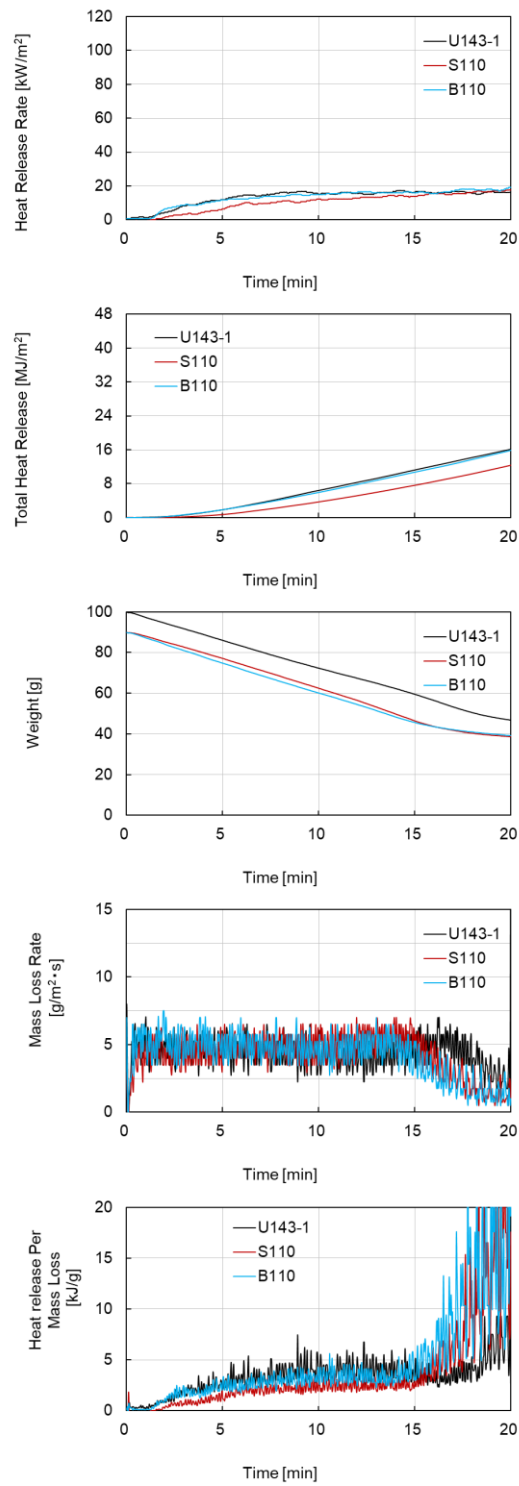


Fig. 3.2-5e

Fig. 3.2-5 Effect of chemical amount and its distribution on burning process

(2) 防火材料としての区分

本検討で使用した難燃処理木材が相当する不燃等級を合計発熱量から判定する。防耐火性能試験・評価業務方法書⁵により難燃材料の場合 5 分、準不燃材料の場合 10 分、不燃材料の場合 20 分の間、規定の 8MJ/m²を超えないことが求められる。これに照らしあわせて、300, 600, 1200 秒間の総発熱量(例えば、300 秒間の総発熱量を THR300 と表記する)を Table 3.2-2 に示す。U 系列では U25、U55 が難燃材料相当、U97、U143 が準不燃材料相当であった。S 系列については S15 が難燃材料相当、S40、S77、S113 が準不燃材料相当であった。B 系列については B77 が難燃材料相当、B113 が準不燃材料相当であった。不燃材料相当と推定されるものはなかった。

Table 3.2-2 Characteristic results of cone calorimeter test

No.	Wood Density [kg/m ³]	Chemical Content after Shaving [kg/m ³]	Peak Heat Release [kWm ²]	Total heat Release [MJ/m ²]		
				THR300* ¹	THR600* ²	THR1200* ³
C-1	266.2	-	127.0	23.4	53.5	77.3
C-2	329.7	-	188.7	24.3	48.4	87.2
U25-1	362.6	27.6	74.2	6.1	12.6	36.3
U25-2	362.6	23.1	71.4	3.4	8.2	24.6
U55-1	362.8	69.6	27.0	2.8	8.2	21.6
U55-2	362.8	42.3	28.1	4.4	10.1	24.1
U97-1	359.7	107	21.2	2.2	6.9	18.0
U97-2	359.7	92.8	23.4	2.4	7.2	18.9
U143-1	358.3	186	17.4	1.9	6.4	16.1
U143-2	358.3	136	23.3	2.8	7.8	18.8
S15	364.3	18.1	97.3	1.8	11.0	34.7
B15	364.3	11.0	110.0	15.6	29.8	51.4
S40	359.0	42.9	67.8	1.4	5.5	24.9
B40	359.0	38.6	84.1	12.7	20.4	36.6
S77	361.0	76.7	20.5	0.7	3.7	14.1
B77	361.0	76.7	45.6	5.6	11.0	23.4
S113	359.5	111	18.4	0.7	3.7	12.4
B113	359.5	114	19.3	1.9	5.9	15.8

*¹ Ranked as *Fire-retardant Material* if THR300<8MJ

*² Ranked as *Quasi-noncombustible Material* if THR600<8MJ

*³ Ranked as *Noncombustible Material* if THR1200<8MJ

3.2.3 考察

(1) 発熱のピーク値に対する薬剤の量・偏在の影響

Fig. 3.2-6 に系列ごとのピーク時発熱速度を示す。U 系列と比較すると、S77, S113, B113 といった平均薬剤量の多いものを除いては、薬剤が不均一に分布することで発炎を生じやすくなり、結果としてピーク時の発熱が増加する傾向を示した。

反対に、これらのピーク値に対する薬剤の偏在の影響は、平均薬剤量の増加とともに小さくなり、薬剤量 100kg/m^3 前後でのピーク値同士を比較すると、S113 では 18.4kW/m^2 、B113 で 19.3kW/m^2 であり、U97-1 のピーク値 21.2kW/m^2 を下回っている (Table 3.2-2)。本薬剤の場合、板材全体の平均で約 100kg/m^3 程度が確保されていれば、製造工程で生じうる薬剤の偏在は、ピーク値に影響しないことが示唆された。

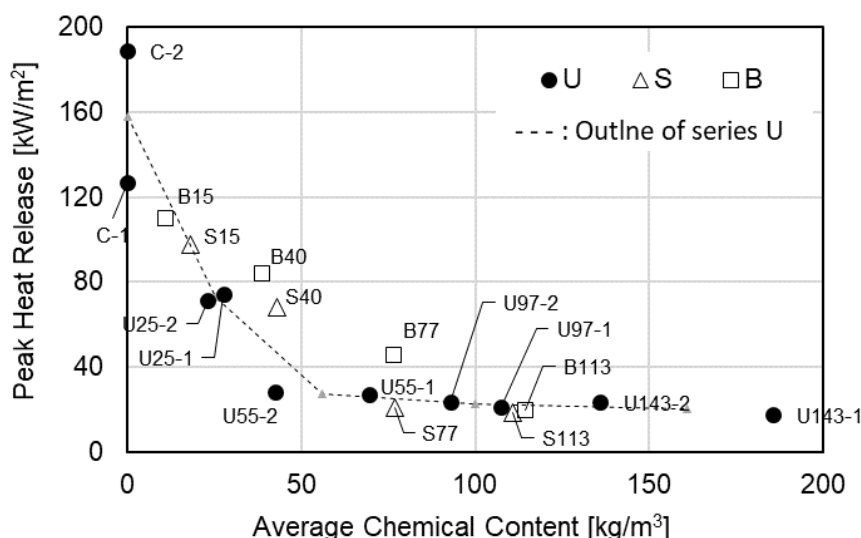


Fig. 3.2-6 Effect of content and dispersion on peak heat release

(2) 発炎燃焼抑制に必要な薬剤量

U25 では試験体表裏面の熱分解に伴う 2 つのピーク付近のみで発炎燃焼を生じ、U55 以上の薬剤量では発炎燃焼を生じないことから、難燃薬剤が均一に分布する場合の発炎燃焼の抑制限界となる薬剤量はこれら試験体の実際の薬剤量である $23\sim 42\text{kg/m}^3$ の範囲に存在すると考えられる。さらに、発炎燃焼を生じた B77 および発炎燃焼を生じなかった B113 の加熱面付近の薬剤量を Fig. 3.2-4 から読み取ると (Fig. 3.2-4 に示す B113 の薬剤分布は、右側が加熱面となる)、最表面の薬剤量は B77 で 25kg/m^3 程度、B113 で 34kg/m^3 程度である。いずれの試験体においても、加熱面付近の薬剤量の板厚方向の勾配は少ないことから、発炎燃焼の抑制限界となる薬剤量は 30kg/m^3 前後であると推測される。

無処理木材 C の発熱速度や質量減少速度の推移にみられるように、一般的に板状の木材の一面に定常の加熱を加えた場合、加熱開始直後と、裏面付近が熱分解する温度となるタイミングとで 2 つのピークが生じる。仮に厚さが十分に厚い板であれば、二つ目のピークは生じず、着火直後が最も大きな発熱速度となる。これは、時間が経過し熱分解する領域が加熱面より深くなるほど、その間に存在する炭化物が熱移動を妨げ、結果的に熱分解領域への時間当たりの熱移動量が小さくなるためである。板状材料で二つ目のピークが生じるのは、裏面が断熱されていることで時間の経過とともに裏面付近において温度勾配が小さいまま温度が上昇し、いわば予熱されたような状況となって一挙に熱分解する領域が増加するためである。これは、試験体 U25 など、低濃度の薬液で処理した難燃処理木材でも認められ、発熱のピークは熱分解速度の増加に起因していることが Fig. 3.2-5b より分かる。ピーク間で発炎燃焼を生じなかったのは、 25kg/m^3 という薬剂量が、ピーク付近での発生する可燃性ガスへの着火を妨げるには不足したが、その間の可燃ガス発生がやや緩慢な期間においては着火を妨げるのに十分であった、ということを示している。ただし、このように緩慢に可燃性ガスが発生し、コーンカロリーメーター試験では発炎しないような場合であっても、実火災や模型箱のようにより大きな面積となると天井面下で滞留した可燃性ガスが燃焼する可能性があり、後述の模型箱試験との燃焼性の差異を引き起こし得る。

(3) 総発熱量に対する薬剤の量・偏在の影響

Fig. 3.2-7 に、すべての試験体の THR300, 600, 1200 と各々の試験体に含まれる薬剂量の関係を示す。なお Fig. 3.2-7a は U 系列の結果のみを抜き出したものであり、THR1200 に付した試験体ラベルは THR300, 600 についても共通である。

Fig. 3.2-7b から d をみると、薬剤が表面に偏在する場合、どの試験体についても発熱は偏在のない場合から増加しないといえる。反対に薬剤が裏面に偏在する場合、発熱は偏在のない場合より増加する傾向であり、B113 のみ、薬剤が均一に存在する場合より発熱が小さい。

さらに、流通する難燃処理木材と同等の薬剂量（約 75kg/m^3 以上）に注目し、薬剤の偏在の影響について詳細に考察する。Fig. 3.2-8 に U 系列の結果に基づいた薬剂量から想定される総発熱量とばらつきの範囲と、S, B 系列の比較を示す。同様に Table 3.2-3 に、均一な場合を想定して期待される発熱量と、偏在を生じている場合の発熱量の比較結果を記載する。

難燃性能を目標とする製品の薬剂量は 75kg/m^3 程度であり、薬剤が偏在を生じた状態として S77, B77 が該当すると考えられる。難燃材料の判定基準となる THR300 を比較すると、B77 は U 系列の薬剂量から想定される総発熱量の 1.89 倍の発熱を示した。一方で、S77 は U 系列の薬剂量から想定される総発熱量の 0.22 倍の発熱であった。したがって、難燃性能を目標とする場合の薬剂量で生じ得る薬剤の偏在では、薬剂量の最低部分が室表面に露出すると防火性能は大きく異なり得る。例えば注入後のプレーナーによる削り加工が

防火性能を著しく低下させる懸念があるほか、防火性能試験を行う際の試験体の調製方法によって、防火材料認定時の状況と流通製品の間で防火性能が乖離する原因となり得る。

準不燃性能を目標とする製品と同程度の薬剤量は 120kg/m^3 程度であり、薬剤が偏在を生じた状態として S113, B113 が該当すると考えられる。準不燃材料の判定基準となる THR600 を比較すると、S113、B113 とともに U 系列から想定される総発熱量より小さく、S113 で 0.51 倍、B113 で 0.81 倍の値を示した。したがって、準不燃材料相当の薬剤量が確保された材において生じうる薬剤の偏在は発熱を増加させず、むしろ木材の表面や裏面の熱分解に伴う発熱を抑制して、均一な場合よりも発熱を抑制するといえる。

以上 2 点から、流通する難燃処理木材の薬剤量を確保すれば、製造における乾燥工程あるいは経年に伴う難燃薬剤の材表への析出は、美観などの火災安全性以外の懸念はあるが、製造時に期待した防火性能を担保する目的に対しては問題にならないと考えられる。

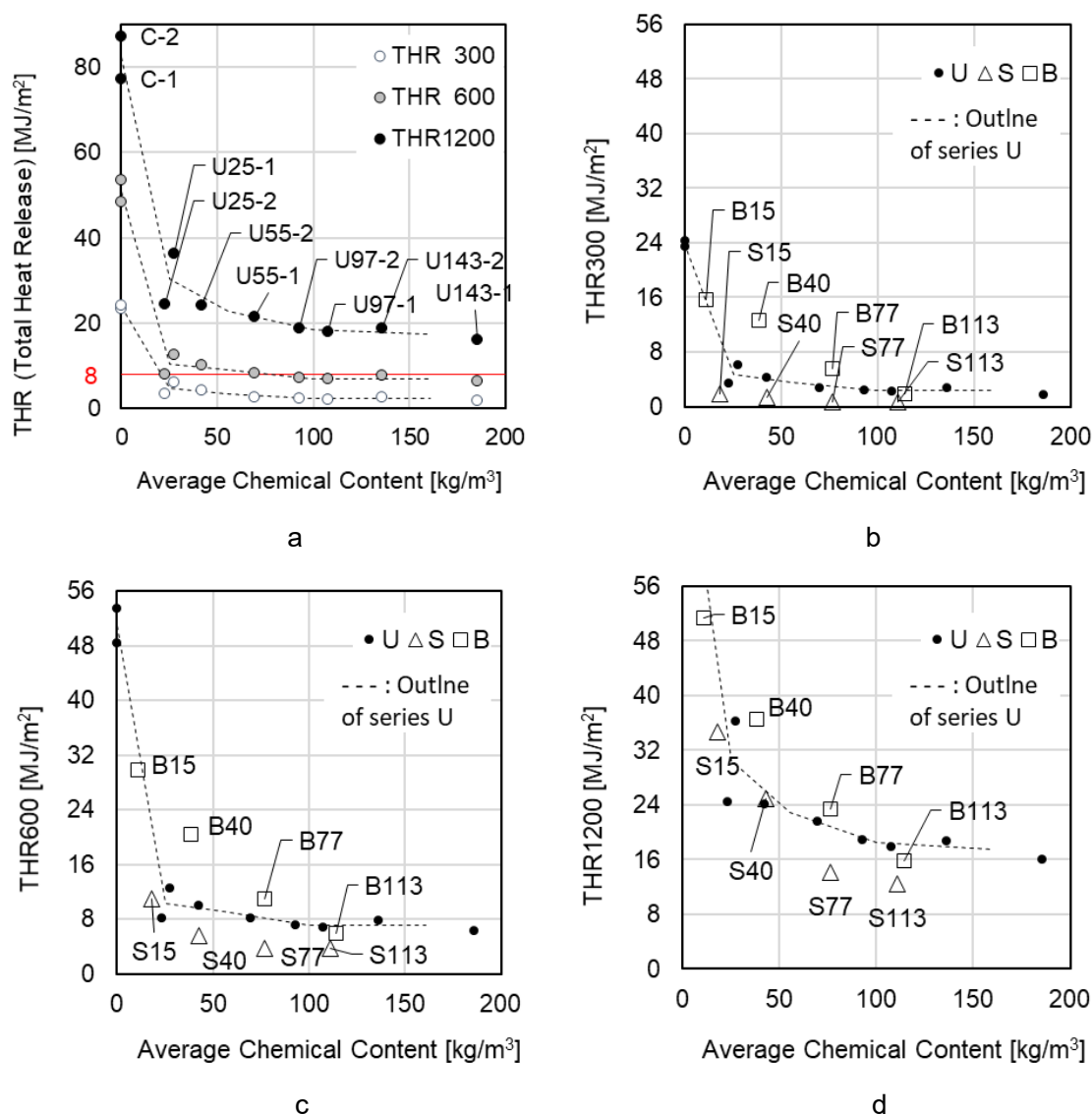


Fig. 3.2-7 Effect of chemical dispersion on total heat release

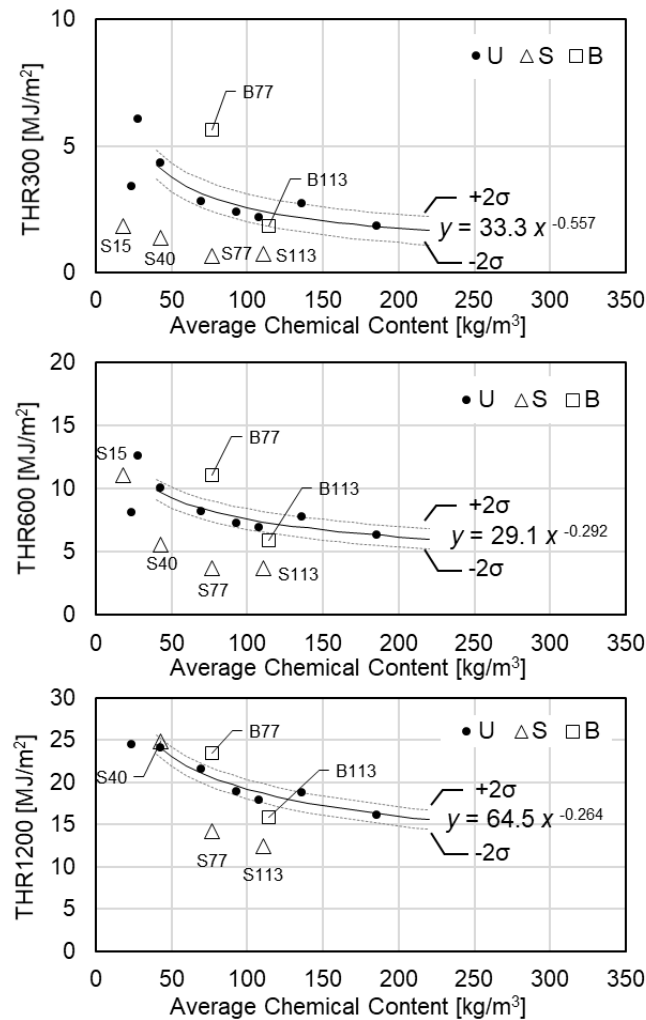


Fig. 3.2-8 Relationships between chemical content and THR derived from series U

Table 3.2-3 Estimated and actual heat release of series S and B

No.	Chemical Content after Shaving [kg/m ³]	A : THR (Total heat Release) [MJ/m ²]			B : Estimated THR			Ratio of A to B		
		THR300* ¹	THR600* ²	THR1200* ³	THR300* ¹	THR600* ²	THR1200* ³	THR300* ¹	THR600* ²	THR1200* ³
S40	42.9	1.4	5.5	24.9	4.10	9.71	23.91	0.33	0.57	1.04
B40	38.6	12.7	20.4	36.6	4.35	10.02	24.59	2.92	2.03	1.49
S77	76.7	0.7	3.7	14.1	2.97	8.19	20.51	0.22	0.45	0.69
B77	76.7	5.6	11.0	23.4	2.97	8.20	20.51	1.89	1.35	1.14
S113	111	0.7	3.7	12.4	2.42	7.36	18.61	0.30	0.51	0.67
B113	114	1.9	5.9	15.8	2.38	7.30	18.46	0.78	0.81	0.86

*¹ Ranked as *Fire-retardant Material* if THR300<8MJ

*² Ranked as *Quasi-noncombustible Material* if THR600<8MJ

*³ Ranked as *Noncombustible Material* if THR1200<8MJ

3.3 模型箱試験による燃え拡がりの評価

3.3.1 目的

前節ではコーンカロリメーターを用いて一様かつ定常の加熱を与えた条件のもとで、薬剤量や薬剤分布の差と燃焼性状の時間的推移との基礎的關係を整理した。一方で、これらは実際の火災において想定されるような火源との距離に応じた加熱強度の大小や天井面下での可燃性ガスおよび煙層の滞留といった現象を再現するものではない。本節では、流通する難燃処理木材と同等の薬剤量の範囲において生じうる難燃薬剤の材内での分布の影響について、実火災に近い状況で評価を行うために、薬剤が均一に材内に分布する場合と表面に集積した難燃処理木材で模型区画を製作し、空間内部での燃え拡がりを評価した。

3.3.2 実験方法

燃え拡がりの評価を行うとともに、試験体の防火材料としての等級付けを判定するために、業務方法書³ 準不燃性能試験方法に定められる模型箱試験を実施した。ただし、実験目的に合わせて幾つかの改変を加えた。以下(1)～(4)に示すように、模型箱の寸法および燃焼室の仕様、試験体支持枠の割り付け、火源バーナー寸法及び火源発熱速度については業務方法書に準じている。しかし、(1)、(5)に示す通り、枠材に LGS スタッドではなく断面寸法 40×45mm のスギ小角材を用いていること、温度等の計測を行っていることについては業務方法書と異なる。

(1) 実験装置および試験体

Fig. 3.3-1～Fig. 3.3-4 に試験体を示す。実験は東京理科大学国際火災科学研究センター火災実験棟内の 2m 角フード下で実施した。後述(7)の方法で難燃処理した板材は縦目地、横目地とも幅 9mm×深 9mm の相決り加工を施して、四隅にビスを打ち、枠材に留め付けた。このようにして製作した側壁用 2 枚、奥壁用 1 枚、天井用 1 枚のパネルを箱型に組んでビス固定し、外側に t0.27mm の亜鉛鉄板を施工した。この模型箱をパーライトボードで仕上げた燃焼室(内寸 W1,100×D1,800×H1,000mm)に収めて燃焼実験に供した。なお、実験時間の 10 分以内には材料裏面への燃え抜けは生じないものと想定して、枠材に LGS スタッドではなく無処理のスギ小角材を用いている。

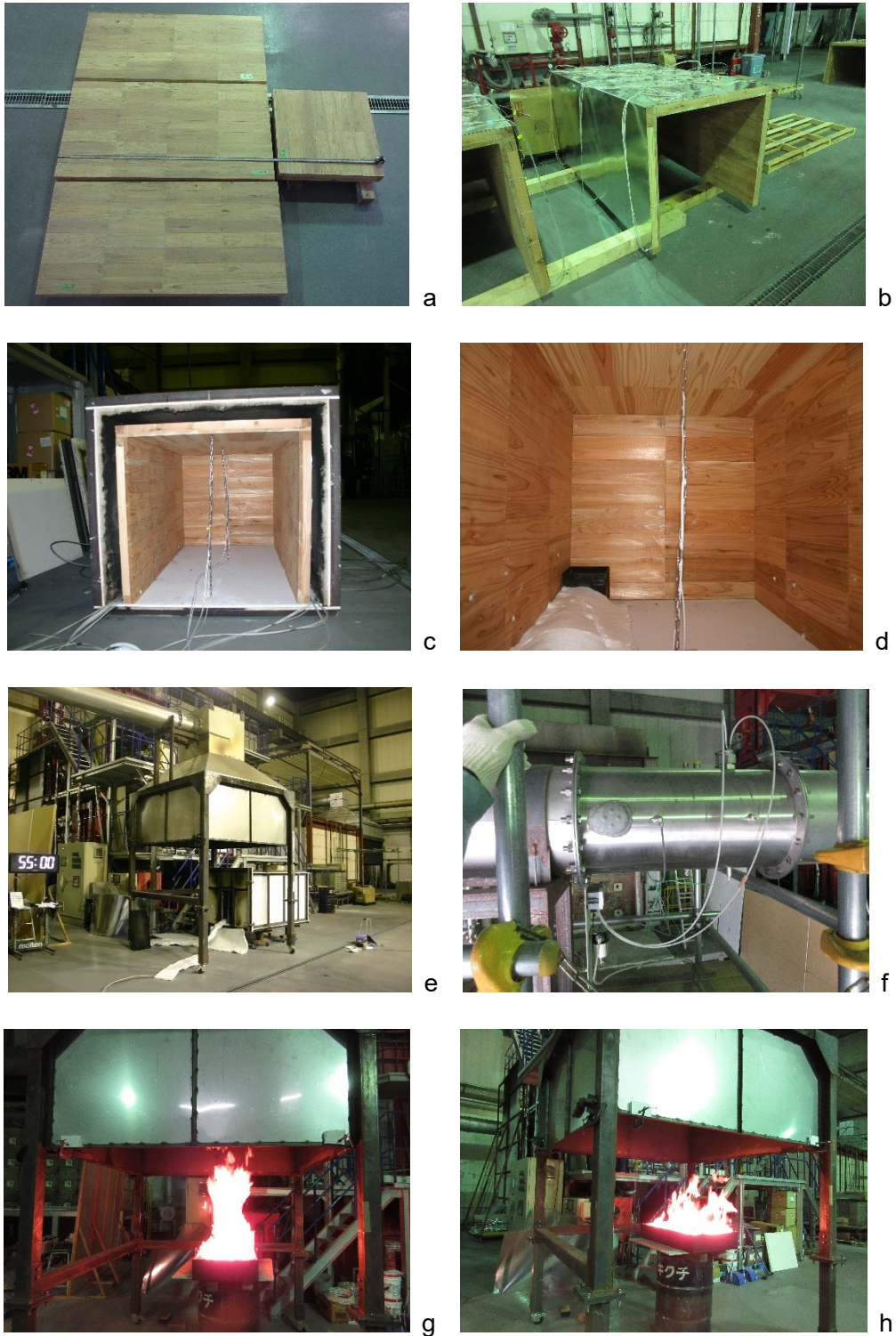


Fig. 3.3-1 Experimental setup

-a, b: Assembly of model box, -c, d: interior view of the model box,
 -e, f: exhaust and gas sampling, -g, h: measurement of source heat release.

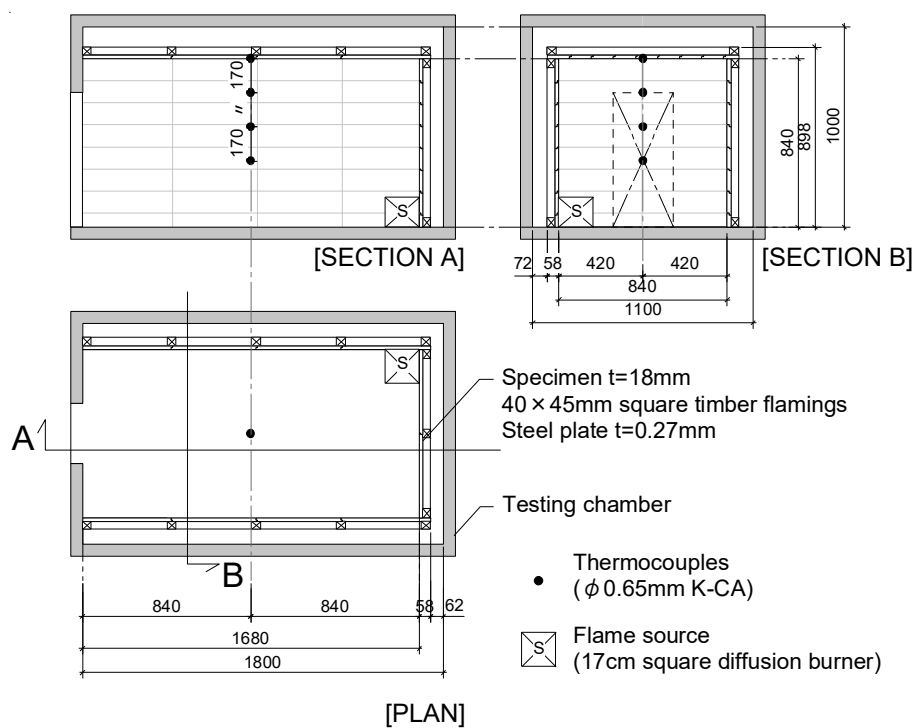


Fig. 3.3-2 Model box and testing chamber

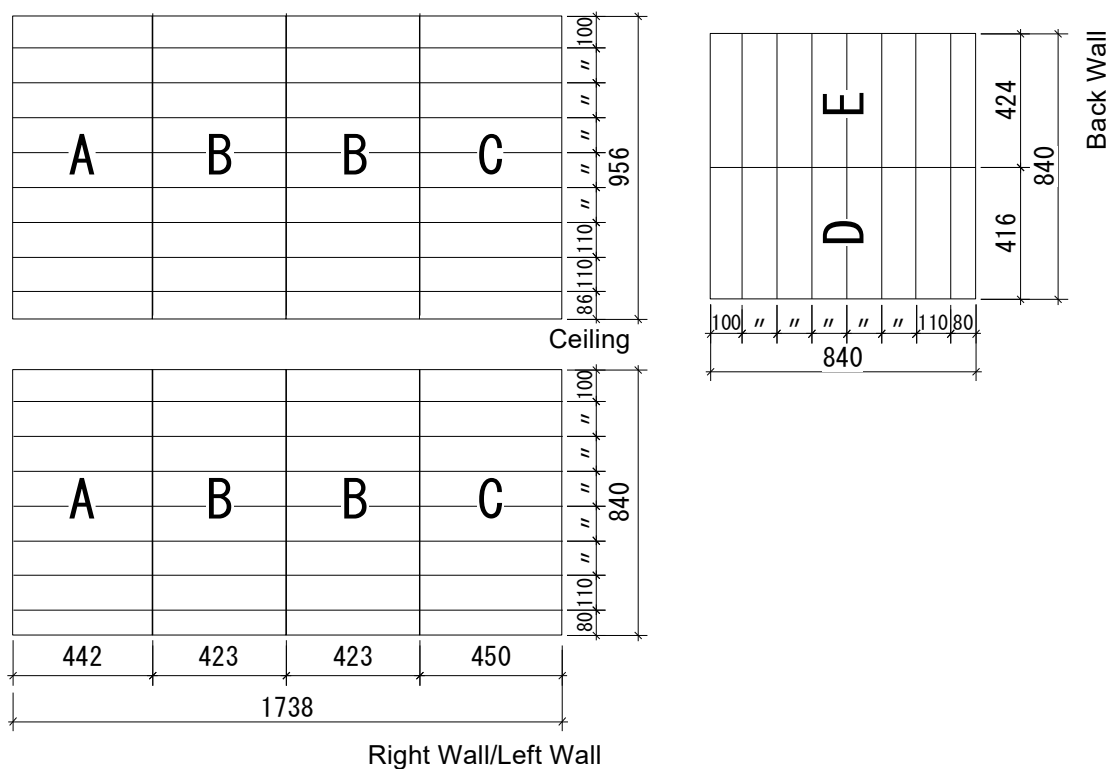


Fig. 3.3-3 Details of panels

(2) 火源

業務方法書に準じて、開口部から見て左奥の入隅に 170mm 角のプロパンバーナーを設置した。燃料が完全燃焼した時の発熱速度が 40kW となるように、ガス流量はマスフローコントローラーを用いて 24.2L/min に調整した。実際の火源単体の発熱速度は Fig. 3.3-5 の通りで、実測された平均発熱速度は、完全燃焼を仮定した数値の 93%であった。バーナーを自由空間に置いた時の火炎片の最高高さは、概ね火源面から 1,150 (床面から 1,300) mm 程度であった。

(3) 実験継続時間

準不燃材料の評価試験と同様に、加熱時間を 10 分に統一した。開口から火炎が持続的に噴出し始めるタイミングをフラッシュオーバー (以下、F.O.) と定義すると、文献⁶において検討対象である 24 種の材料 (木質材料および有機系壁紙等で、難燃～不燃材料に分類される) の中で、20 分間のルームコーナー試験において F.O.を生じた材料は模型箱試験で 4 分以内に F.O.を生じている。

(4) 発熱速度の計測

燃焼ガスは 2m 角のフードで集煙して O₂、CO₂、CO 濃度を分析し、酸素消費法により発熱速度を算出した。エタノール火源を完全燃焼と仮定して、酸素消費法により得られた発熱速度の実測値を燃焼熱の理論値で除して算出した集煙効率は 150kW 付近で 100%、300kW 付近で 90%程度であった。

(5) 温度計測・焼損状況の記録

模型箱の床面から 330mm 以上の高さにおいて区画内の壁面温度分布・空気温度分布を計測した (Fig. 3.3-2、Fig. 3.3-6)。壁面温度の計測には芯線 φ0.32mm、区画内温度には芯線 φ0.65mm の K-CA 熱電対を用いた。

本実験は板厚方向の難燃薬剤分布と区画内の燃焼を関連付けることを目的としていることから、加熱終了後は速やかに消火したのちパネル状に解体し、焼損面積および隅角部を中心とした炭化深さの計測を行った。

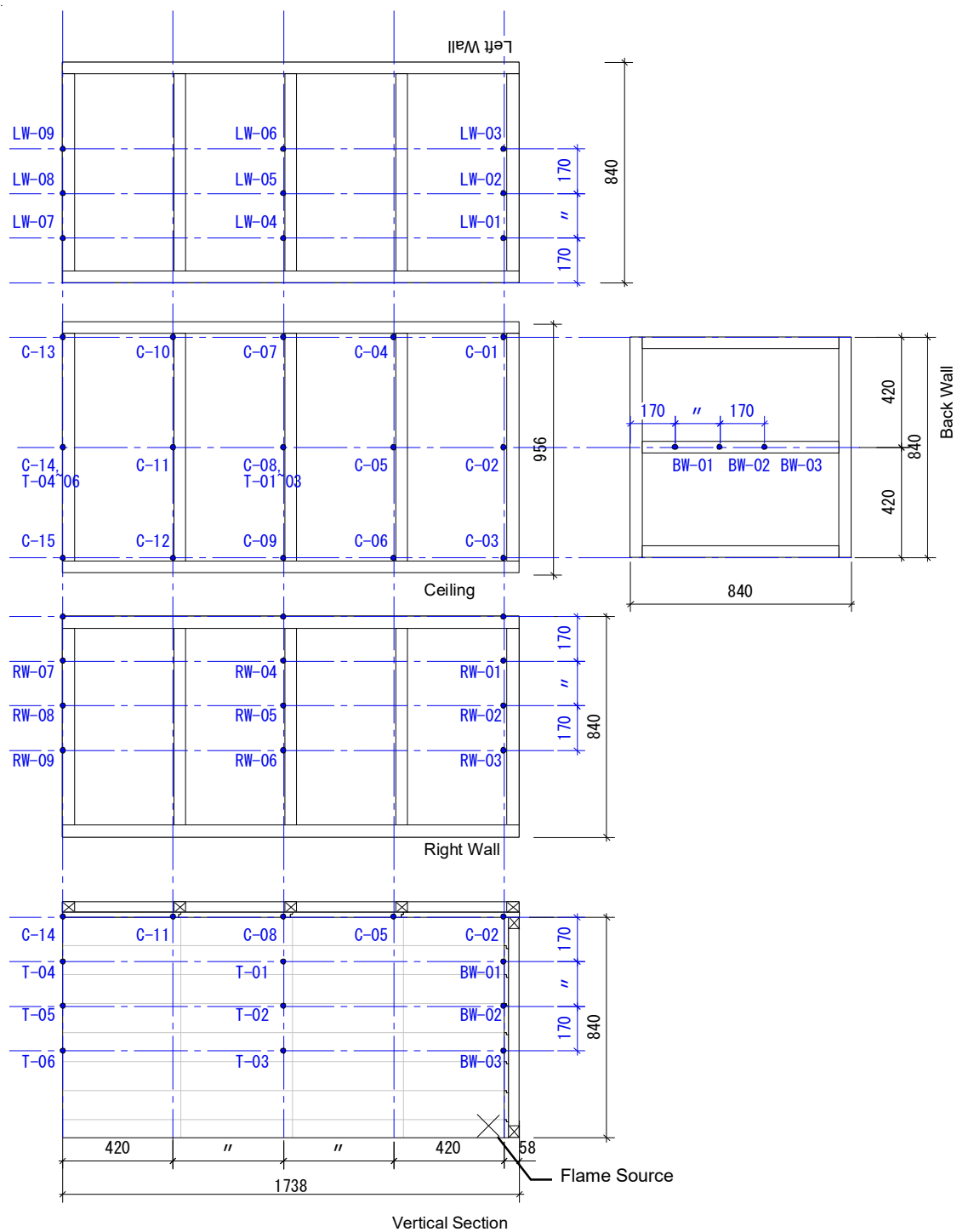


Fig. 3.3-6 Arrangement of thermocouples

(6) 試験体の調製方法

前節でコーンカロリメーター試験に用いた試験体は小型であった為、試験体の調製や選別が容易であったが、本節では各条件に対し 5.6m^2 程度の面積を、板材間のばらつきを抑制しながら製作する必要がある。そこで、挽板の選別による薬剤分布の制御可能性についても検討した。心材、辺材およびその両方を含む3パターンで切り出した $62.5 \times 25 \times 120\text{mm}$ (L×R×T) の小片に注入実験を行い、各々の材に薬剤がどう注入されるか把握した。薬剤は前節と同一のポリリン酸カルバメートの主成分とする薬剤(丸菱油化製ノンネン W2-50)、注入条件は薬液の 16%溶液に浸漬した状態で、ゲージ圧の制御により減圧 (-0.09MPa) 30分、加圧 ($+0.95\text{MPa}$) 2時間、減圧 (-0.09MPa) 30分で薬液を圧入した。挽板を1週間の風乾、2週間の熱風乾燥 (60°C) により乾燥させた。注薬・乾燥後に繊維方向の中央から厚 4.5mm のサンプルを切り出して蛍光 X 線分析に供した。Fig. 3.3-7 に結果を示す。明色ほど難燃薬剤の固定量が多いことを示す。図より、心材、辺材で薬剤の分布性状が異なることが読み取れ、概して心材においては薬剤の総量が他の部位に比べて少なくなるものの、偏在は抑制される傾向が認められた。以上について、より詳細な検討結果は文献⁷にて報告されている。

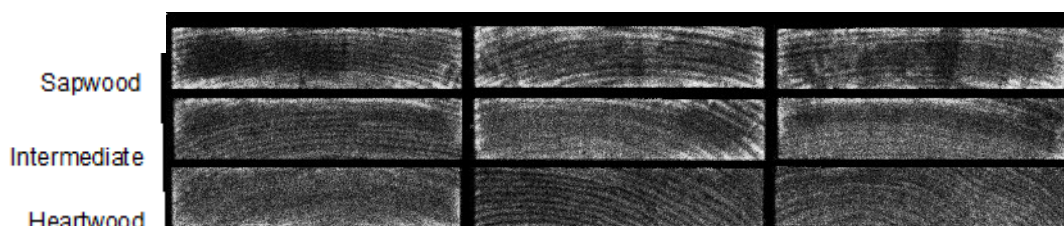
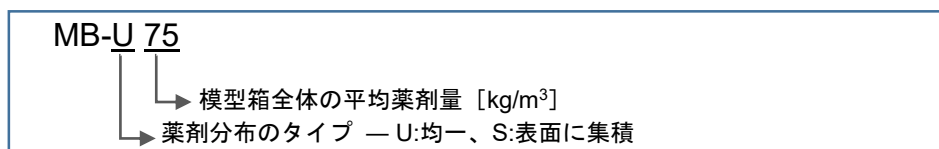


Fig. 3.3-7 Distributions of fire-retardant chemicals within sap- and heartwood (N=3)
Brighter color indicates the presence of more chemicals.

(7) 試験体の諸元

試験体記号は MB-U [薬剤量平均(kg/m^3)] または MB-S [薬剤量平均(kg/m^3)]と表記する。



(6)を踏まえて、偏在が少ないパターン(MB-U 系列)として厚い心材挽板に対して薬剤注入、乾燥を行ったのち厚く仕上げ削りを行ったものを製作することとした (Fig. 3.3-8)。対照的に、辺材または心辺材の両方を含む場合には、材表に難燃薬剤が集中する傾向であったので、これらの材を用いて偏在の大きいパターン(MB-S 系列)を製作することとした。MB-S 系列の製作では、まず仕上げ厚さに近い 20mm 厚の挽板に注入したのち、前節のコーン

カロリーメーター用試験体を製作した方法と同様に 2 枚合わせで乾燥を行い、非加熱面となる側のみを切削することで加熱面に薬剤の集積した状態とした。

また、U, S 系列間で薬剤量の平均値が同程度となるように、これらの製作順は以下のようにした。厚く仕上げ削りを行う U 系列（偏在が小さいパターン）の注入、乾燥、削りを行い、削り作業後に算出した平均薬剤量を目標量として、偏在の大きい S 系列を難燃処理する際の薬液濃度を決定した。この段階での薬剤量は、試験体全体の傾向を把握するために、Fig. 3.3-4 の①の状態(挽板単位)で計測した薬剤注入前後の挽板の全乾密度差から推定した。

以上の要領で、模型箱 4 体それぞれに用いた挽板ごとの薬剤量について、ヒストグラムとしたものが Fig. 3.3-9 である。Fig. 3.3-9 および Table3.3-1 から分かるように、上記の工程を経てもなお、目標値が同一の 2 試験体の間に 25kg/m^3 程度の誤差が生じた。

Table3.3-1 Specification list of model box specimens

No.	Concentration of Impregnated Solution [wt%]	Drying Condition and Shaving	Wood Density [kg/m ³]	Chemical Content after Shaving [kg/m ³]
MB-C	-	-	311.5*	-
MB-U75	16	28°C60%RH/1week →60°C/1week	301.1*	74.5*
MB-U150	25	Surface 6mm Removed	330.6*	145*
MB-S45	10	28°C60%RH/1week →60°C/1week	316.5*	43.9*
MB-S120	16	→60°C/1week	317.7*	119*

* : Average of All Boards

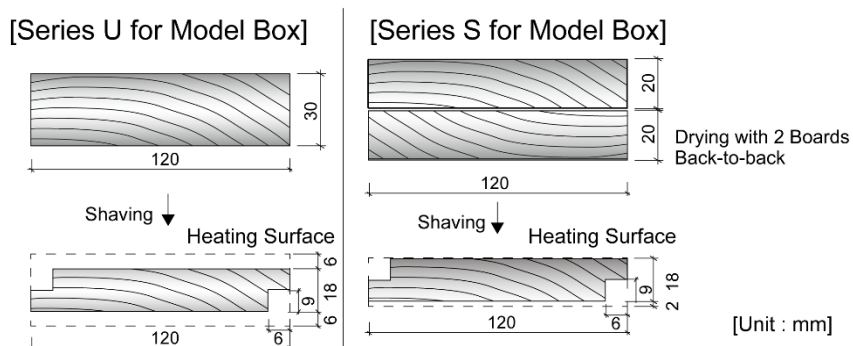


Fig. 3.3-8 Procedures for controlling chemical distribution of the specimens

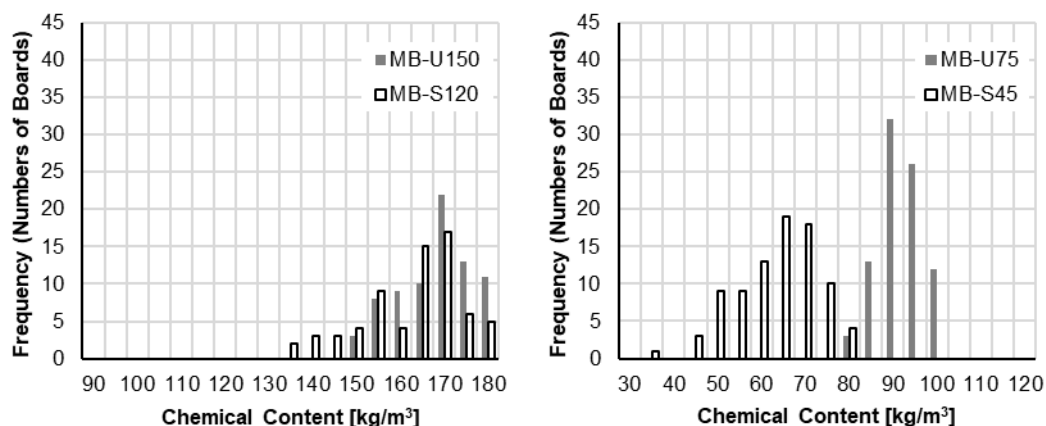


Fig. 3.3-9 Histogram of chemical content in each board

(8) 蛍光 X 線分析による挽板の全数確認と割り付けの検討

Fig. 3.3-4 の②の位置から切り出した薄切りサンプルを 2 章で述べた蛍光 X 線分析に供し、注入処理した全ての挽板の厚さ方向の薬剤分布を把握した。計測データを基に、薬剤分布の類似したものを選別し、基材密度と薬剤量の偏差の少ないものから天井、壁面の上半分、壁面の下半分、の順に割付けた。

薬剤の板厚方向の分布を部位ごとにまとめ、Fig. 3.3-10 に示す。なお、定量データとしての精度を確保するために、Fig. 3.2-4 と同様に、板幅方向中央 8mm の帯状の領域におけるラインプロファイルとしてある。エラーバーは全板材の標準偏差を示す。

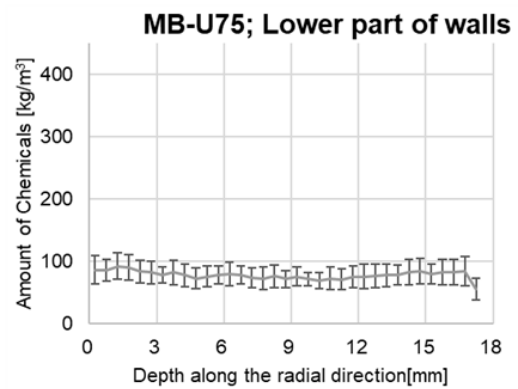
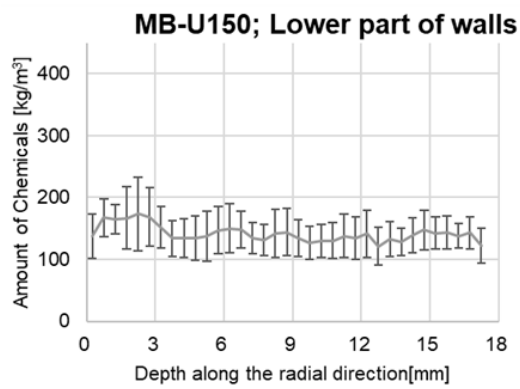
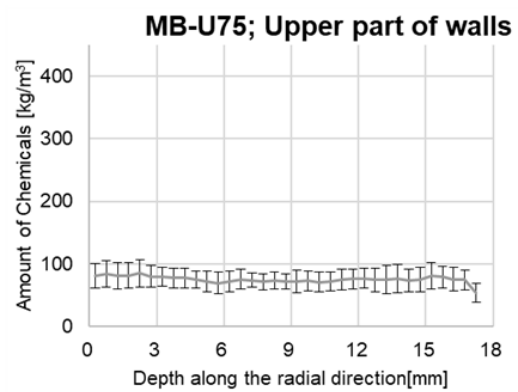
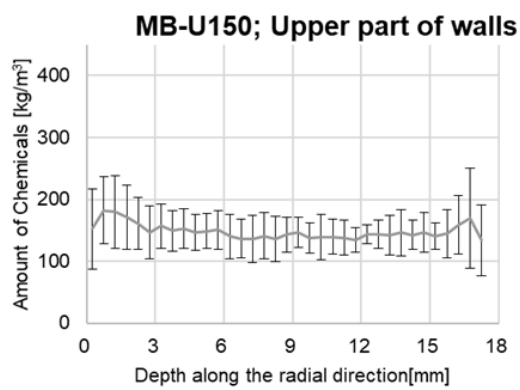
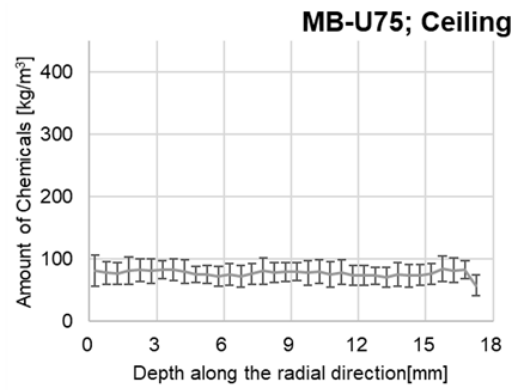
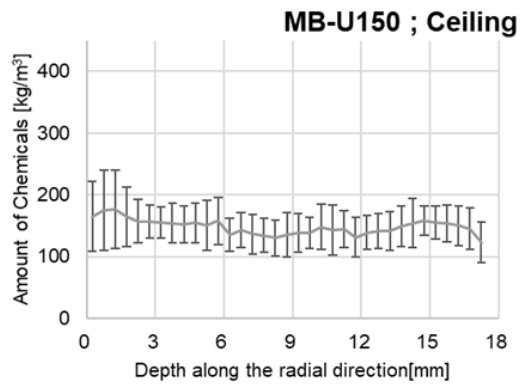


Fig. 3.3-10a: MB-U150

Fig. 3.3-10b: MB-U75

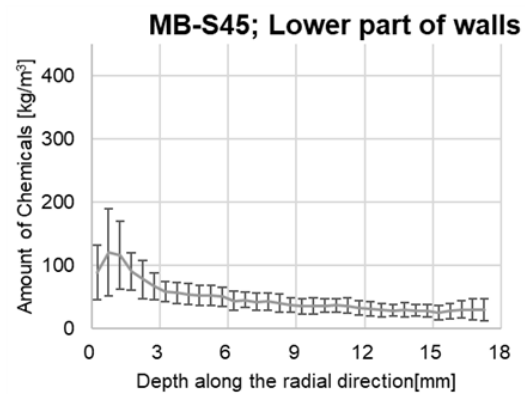
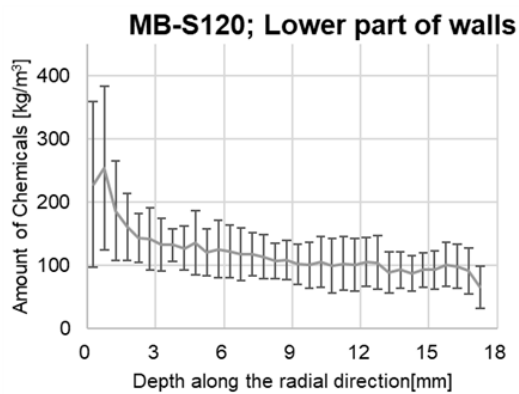
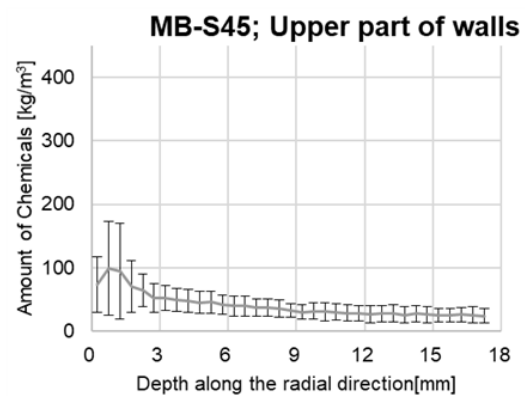
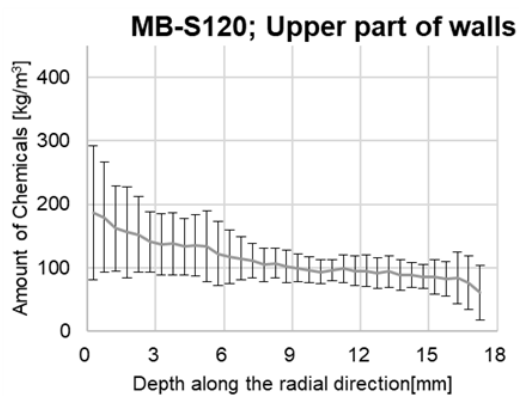
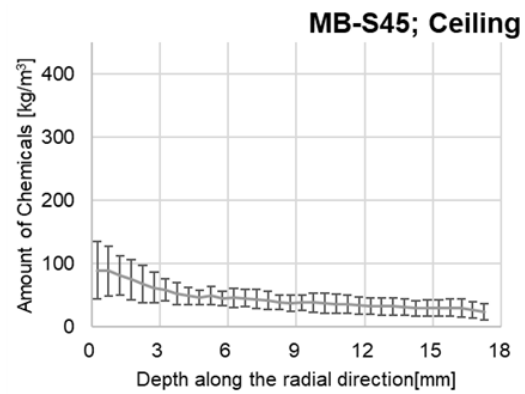
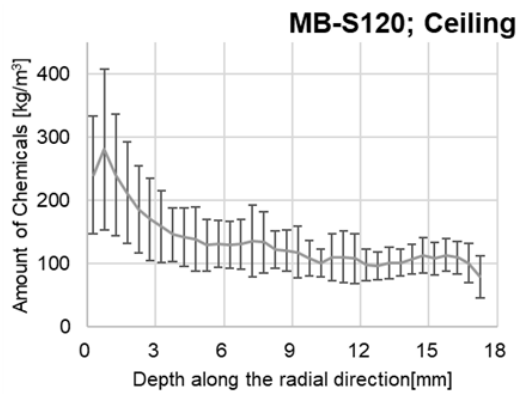


Fig. 3.3-10c: MB-S120

Fig. 3.3-10d: MB-S45

Fig. 3.3-10 Perpendicular distributions of fire-retardant chemicals

-a : MB-U150, -b : MB-U75, -c : MB-S120, -d : MB-S45

Error Bars in gray refers to the standard deviations of all boards.

3.3.3 結果

(1) 無処理木材

Fig. 3.3-11 に実験時および実験後の写真を示す。実験開始 1.5 分で F.O.を生じた。また、実験終了直前の 8 分 45 秒時にも小さな爆発音とともに噴出火炎の増長が認められた。10 分で火源バーナーを抜き去り、10 分 50 秒より窒息と放水による消火を試みたが、消火を確認したのは 12 分の時点であり、自己消炎性は低いと言える。また、炭化は耐火加熱試験において一般的と考えられている炭化速度 $0.6\sim 1.0\text{mm}$ から予測される深さを大幅に超えて厚 18mm 全体が炭化した。8 分 45 秒時の 2 次的な F.O.は、パネル裏面の全体に燃焼が拡大したことで生じたものと考えられ、ここから推定される炭化速度は 2.2mm/min となる。F.O.発生以降は区画内が高温の煙層と火炎で充満して、壁面に強い放射熱を与えたことや、板同士の相じゃくりの継目は、板厚の半分まで燃え抜けると、裏面との通気が生じることなどが要因として考えられる。

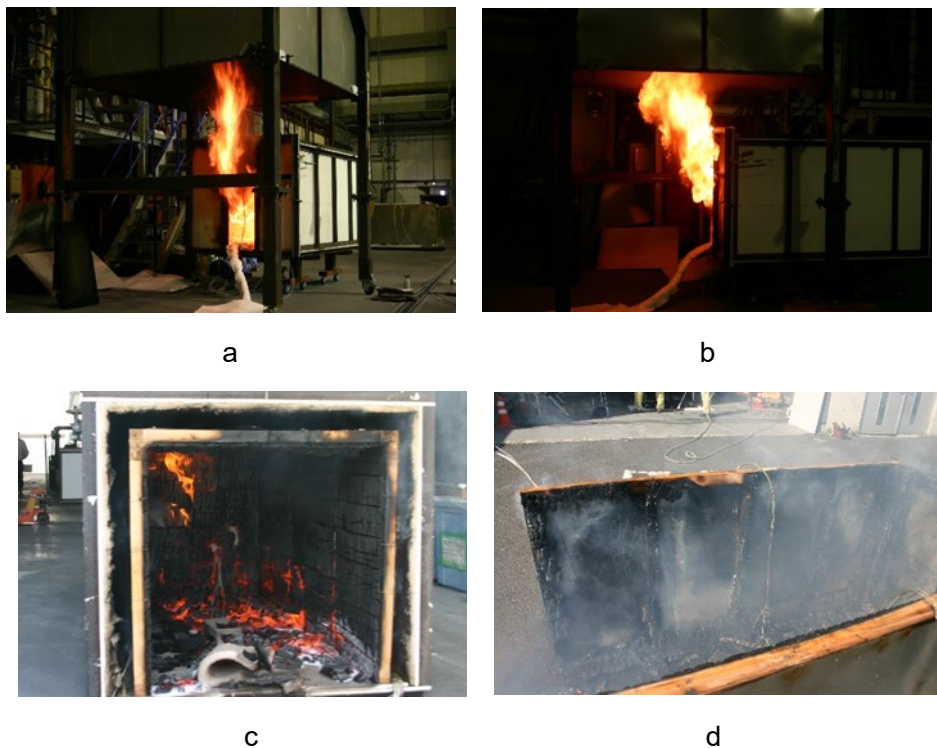


Fig. 3.3-11 Experimental overview (MB-C)

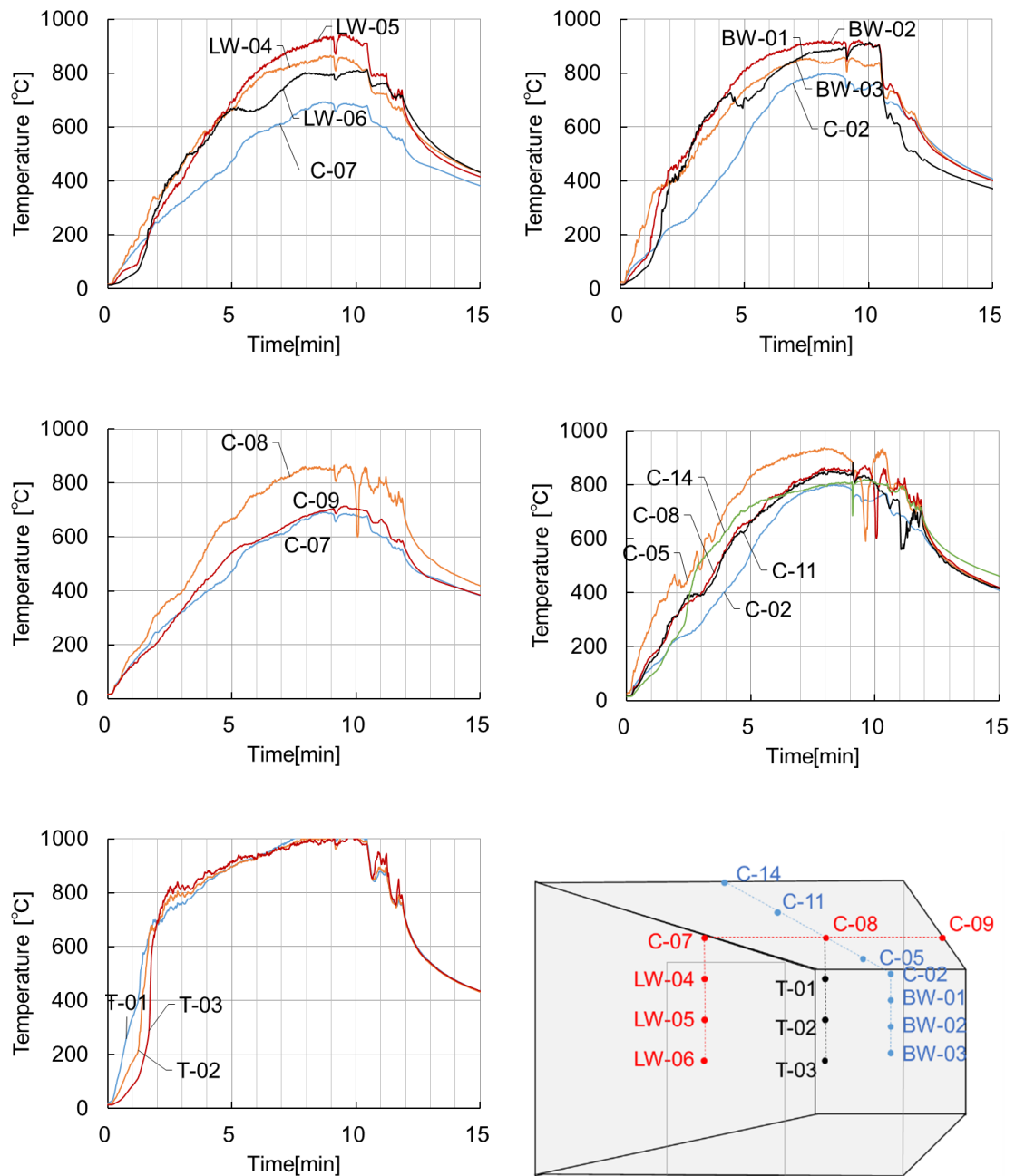


Fig. 3.3-12 Wall and air temperatures (MB-C)

(2) 難燃処理仕様



Fig. 3.3-13 Experimental overview (MB-U150)

Fig. 3.3-13 に MB-U150 の実験時および実験後の写真を示す。10 分以内には F.O.は生じなかった。また 10 分経過後に火源を抜き去ると直ちに自己消炎した。

MB-S120 は加熱開始後 1 分程度で煙層の下端高さが 500mm 程度まで達したが、以降は顕著な煙層の降下は見られなかった。実験時間内に F.O.は発生しなかった。また、10 分で加熱を停止、11 分 20 秒で火源を抜き去ると直ちに自己消炎した。

MB-U75 は加熱開始後 1 分 35 秒程度で煙層の形成が確認できた。実験時間内に F.O.は発生しなかった。10 分経過後に火源を抜き去ると、直ちに自己消炎した。

Fig. 3.3-14 に MB-S45 の実験時および実験後の写真を示す。実験終了直前（8 分 55 秒～9 分 45 秒まで）開口から流出する煙の中に火炎が断続的に認められたことから、実験を継続していた場合には、火炎が連続的に噴出する程度には燃焼が進んだ可能性がある。10 分経過後に火源を抜き去ると直ちに自己消炎した。



Fig. 3.3-14 Experimental overview (MB-S45)

以上の試験体において計測された温度の推移を Fig. 3.3-15～Fig. 3.3-18 に示す。なお、隅角部の温度は平坦部より著しく低い温度を示したので、壁面温度としては平坦部での計測値を採用した。前節のコーンカロリーメーター試験から、S 系列の実験後半などでは、発生した可燃性ガスが着火限界の濃度になるまで滞留することにより着火することなどが想定されたが、いずれの試験体でも、Fig. 3.3-12 に示した無処理試験体 C とは反対に、概し

て気相よりも壁面温度の方が若干高い程度を示しており、天井面下での発炎燃焼等は温度から判定できるほど顕著ではなかった。

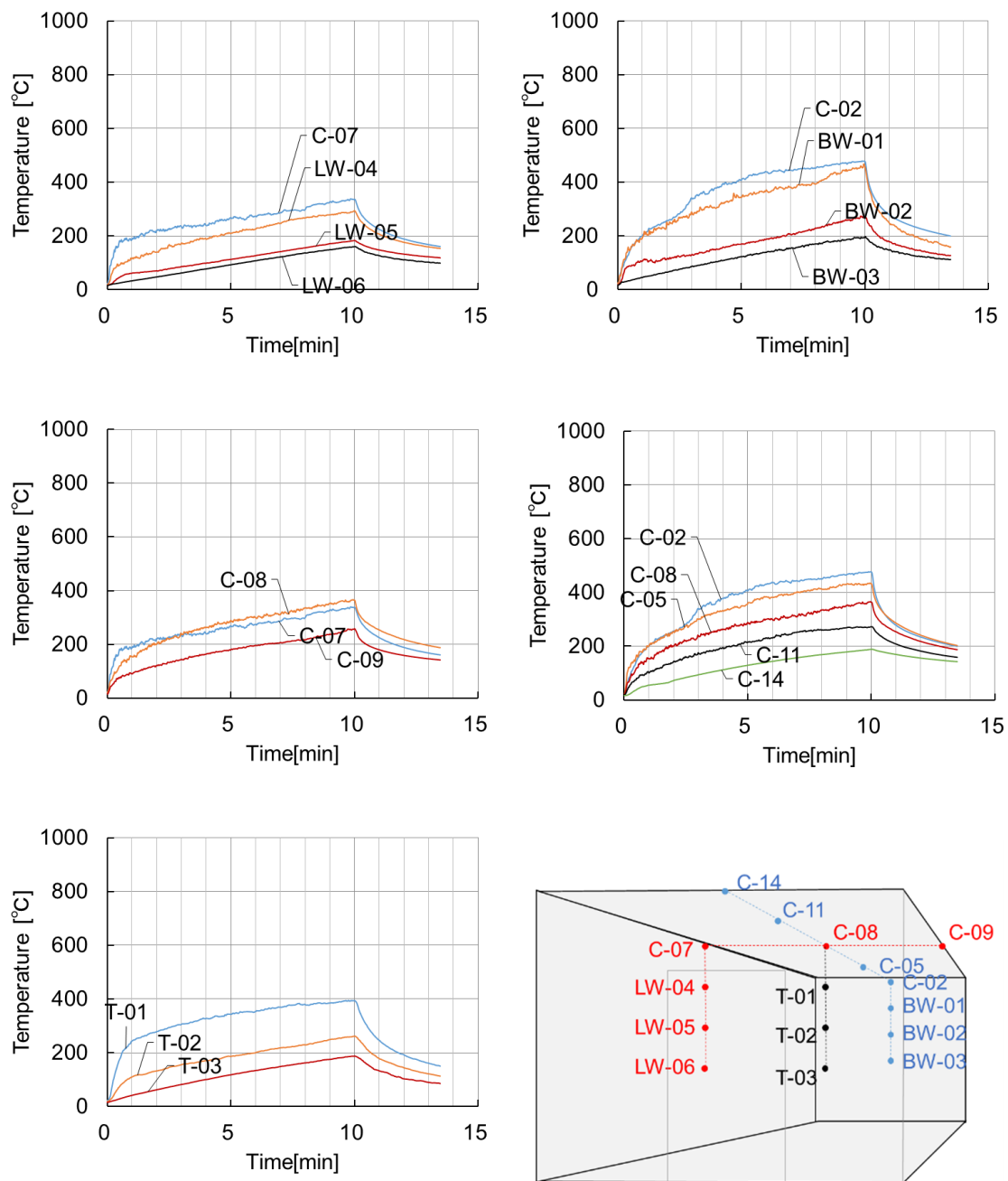


Fig. 3.3-15 Wall and air temperatures (MB-U150)

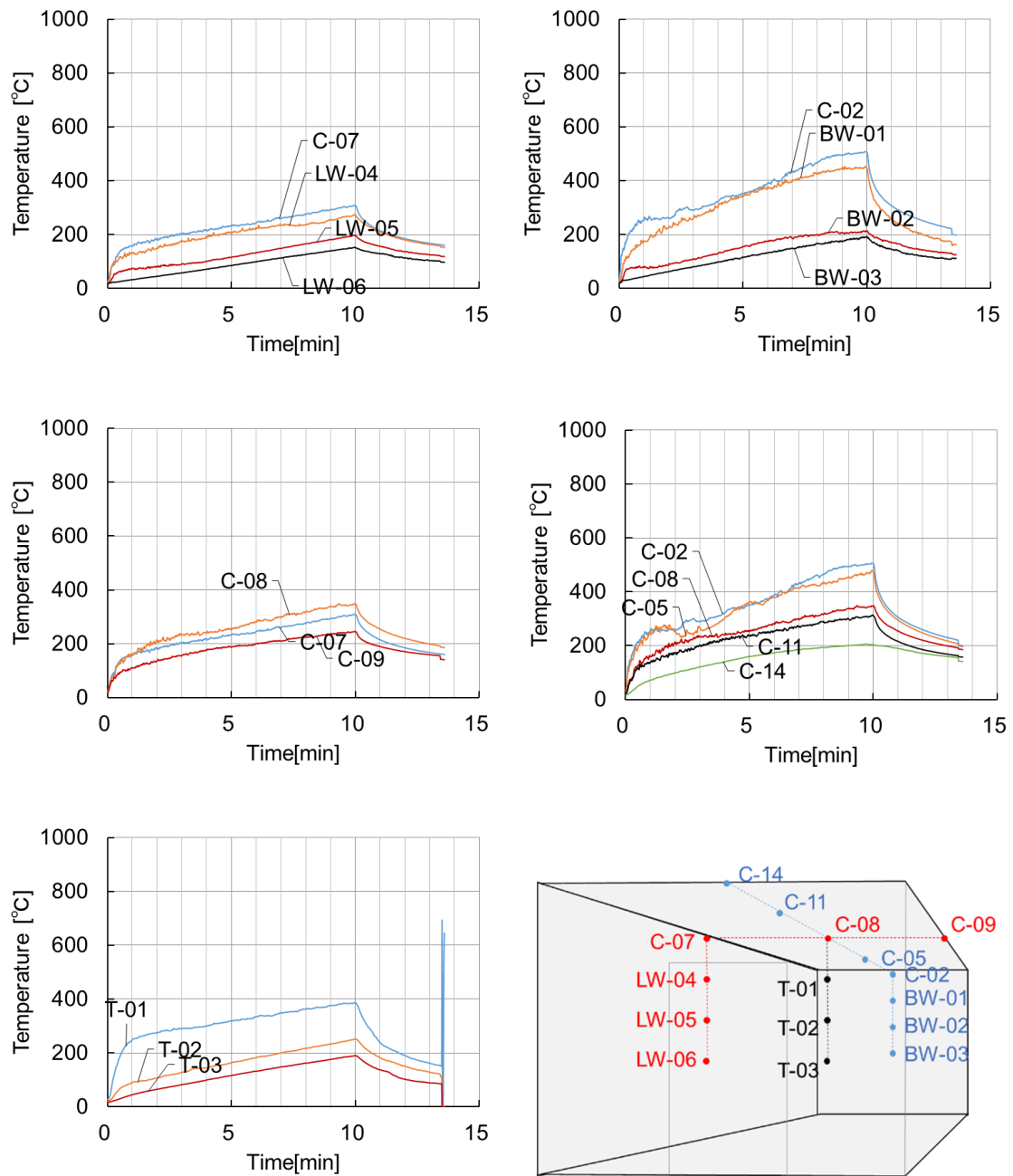


Fig. 3.3-16 Wall and air temperatures (MB-S120)

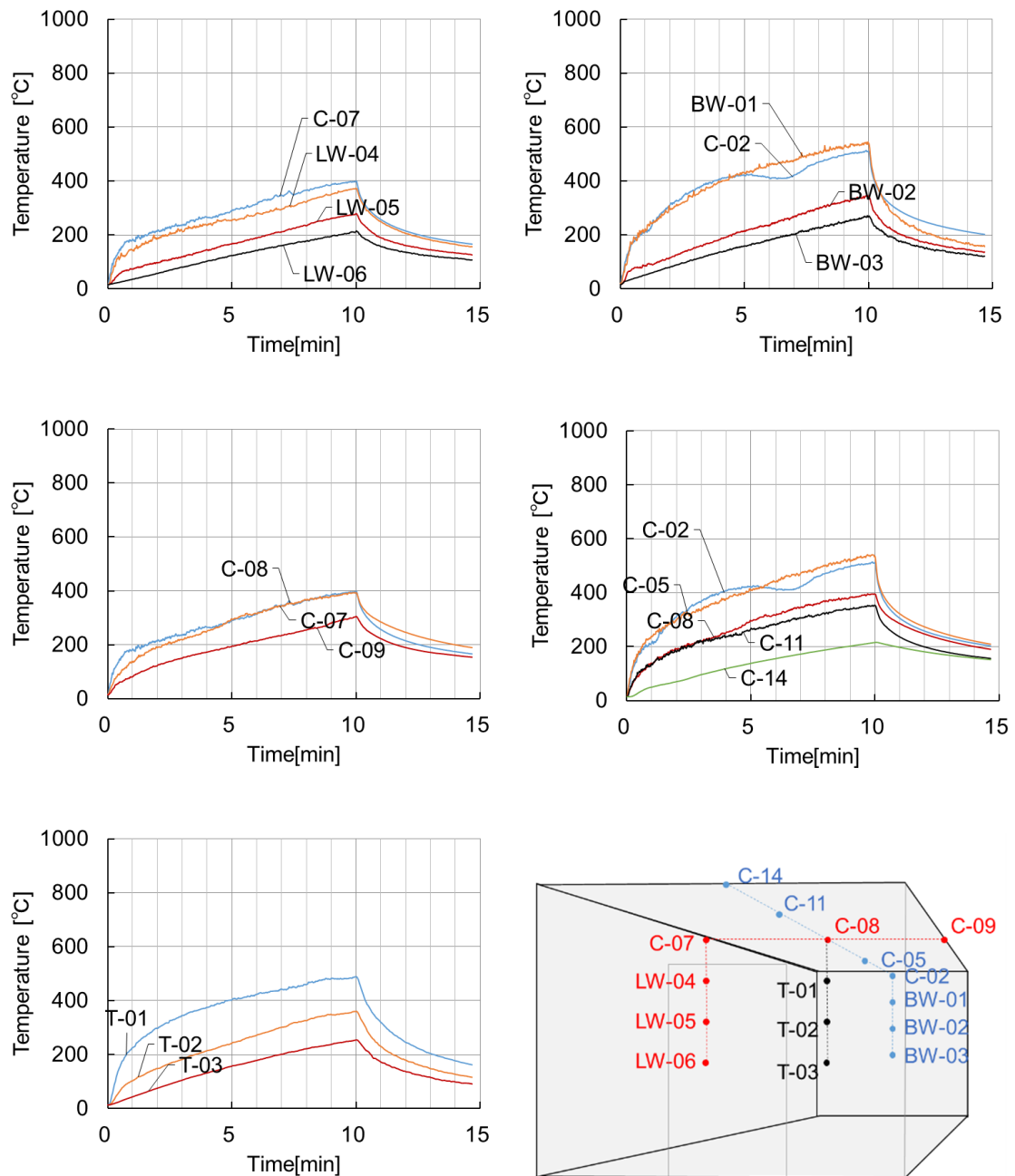


Fig. 3.3-17 Wall and air temperatures (MB-U75)

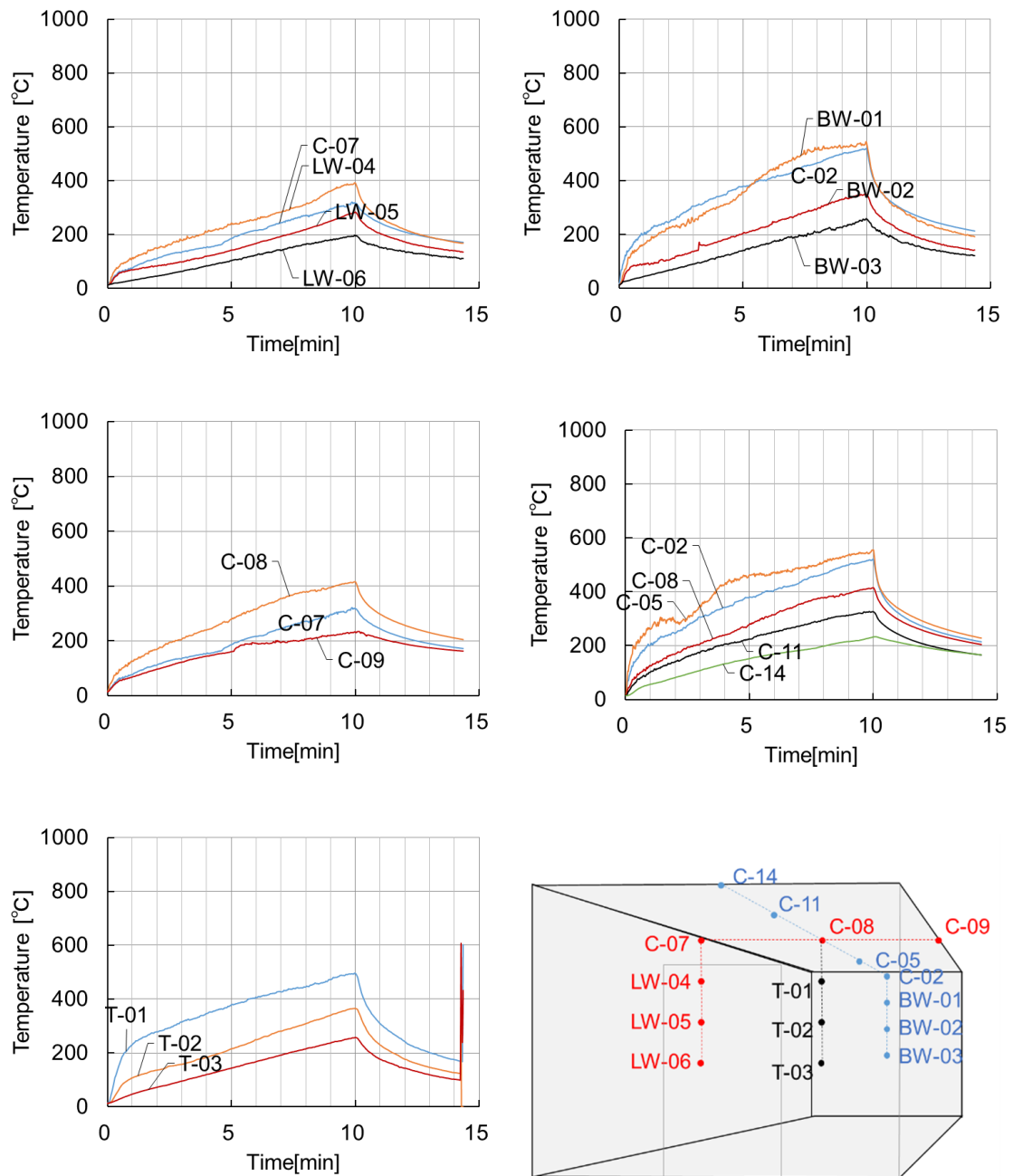


Fig. 3.3-18 Wall and air temperatures (MB-S45)

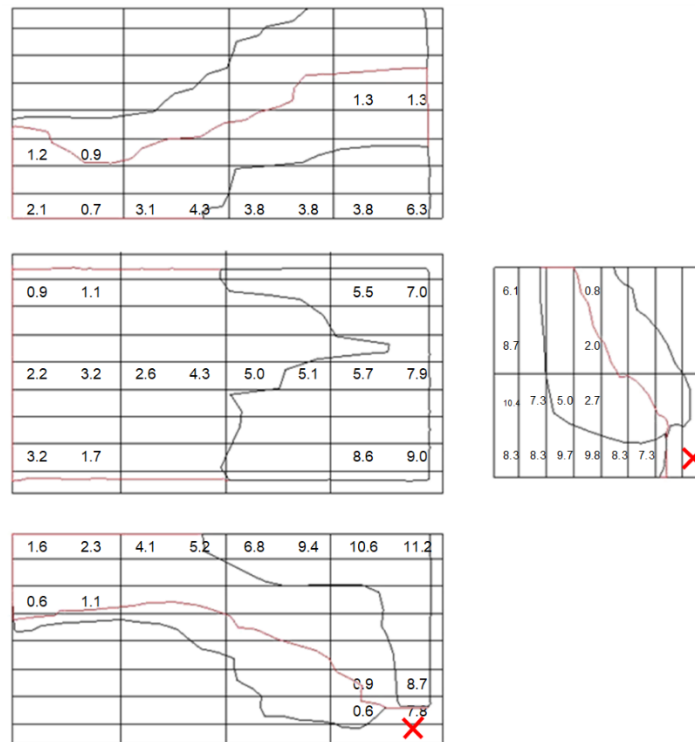


Fig. 3.3-19 Distribution of char depth (MB-U150)

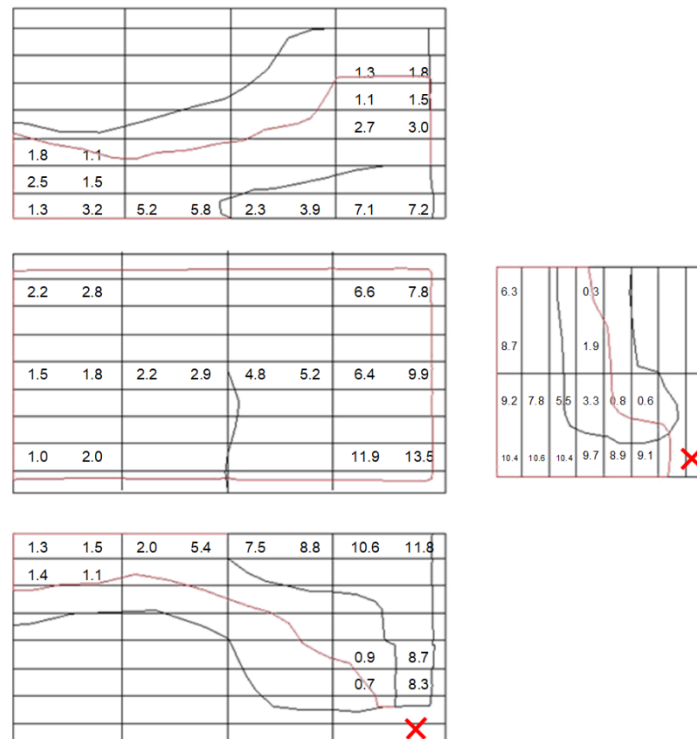


Fig. 3.3-20 Distribution of char depth (MB-S120)

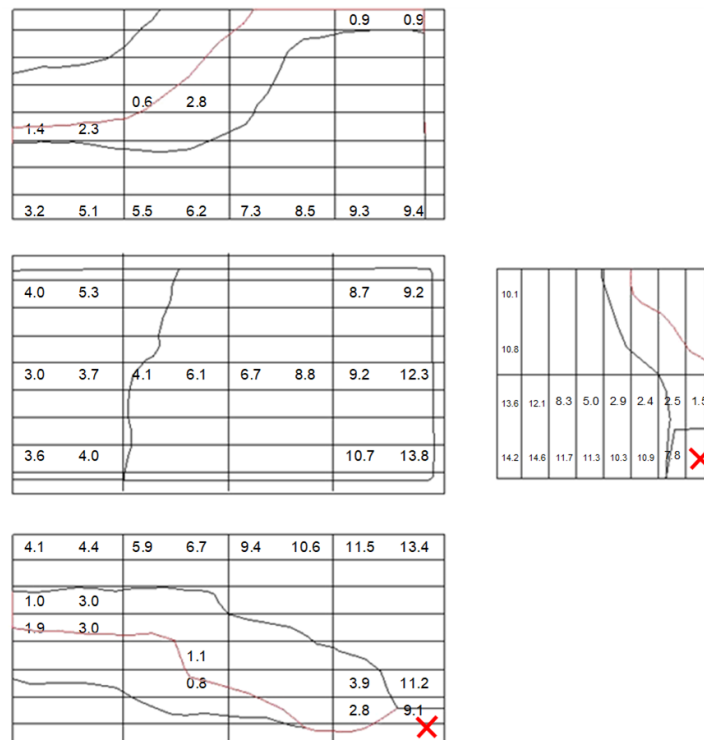


Fig. 3.3-21 Distribution of char depth (MB-U75)

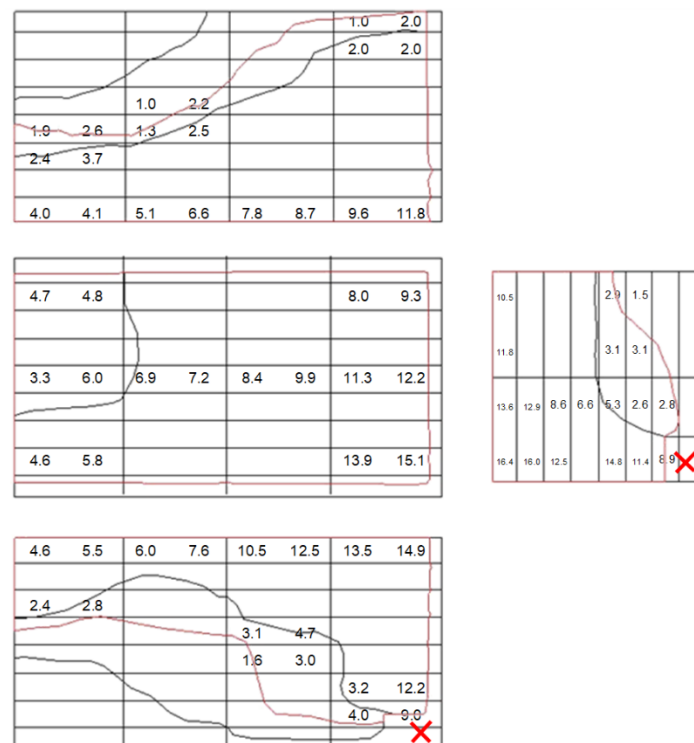


Fig. 3.3-22 Distribution of char depth (MB-S45)

3.3.4 考察

(1) 室温度に対する薬剤の偏在の影響

Fig. 3.3-23 に加熱 5 分、10 分時点の室中央における上下方向の温度分布を示す。無処理スギ試験体においては、F.O.以前の煙層の降下が顕著であり、F.O.以降においては開口付近の煙層は床面から 300mm 程度に位置し、開口から離れた室奥では床面まで火炎に包まれた。区画内温度についても、すべての計測点(床面からの高さ 330mm 以上)において 800℃ 以上を観測した。難燃処理を行った仕様の煙層下端高さは、仕様間で顕著に異なることなく床面から 500mm 程度であった。10 分間の実験時間中に 600℃を超えた計測点はなく、上下方向の温度分布については、MB-U75 と MB-S45 および MB-U150 と MB-S120 それぞれがほぼ同じ温度となっている。含まれる薬剤量を考慮すると、表面に薬剤が集積する方が、区画内温度が低くなると言える。

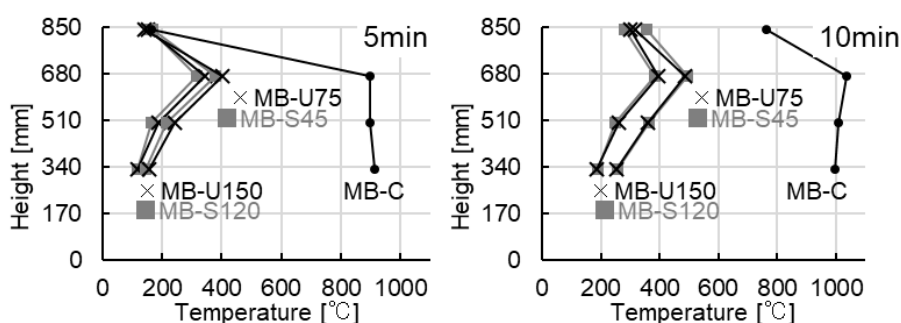


Fig. 3.3-23 Vertical temperature distributions (model box test)

(2) 発熱速度と薬剤分布の関係

火源の寄与分を含む発熱速度の推移を Fig. 3.3-24 に示す。MB-C の最大発熱速度は 438kW(4 分 9 秒)で、F.O.直後から 386~438kW で推移した。難燃処理を施した 4 仕様については、いずれも時間の経過とともに発熱速度が漸増する傾向であったが、最大でも 60.9kW (MB-S45、9 分 6 秒)で、発熱速度の終局的な大小関係は MB-S45≒MB-U75>MB-U150≒MB-S120 となった。この大小関係を Fig. 3.3-10 に示した薬剤分布と比較すると、概ね表層 3mm での薬剤量の傾向と合致するといえる。いずれの試験体においても、炭化の進行は火源に近接する壁隅角部で最も早く、炭化深さは MB-U150 で最大 10.3mm、MB-S120 で 13.5mm、MB-U75 で 14.2mm、MB-S45 で 16.4mm に達した(Fig. 3.3-19~Fig. 3.3-22、数字は各点の炭化深さ)。平均薬剤量が多いほど最大炭化深さは小さく、亀裂を伴う燃焼範囲もこの傾向と一致している。一方で、終局的な発熱速度の大小関係とは表面の炭化を含む燃焼範囲が一致した(Table 3.3-2 および Fig. 3.3-25)。

MB-S45 と MB-U75 を比較すると、加熱初期は MB-S45 の発熱が小さく、加熱時間と

もに発熱が増加する傾向で、5分以降はほぼ同じか、MB-S45の方がやや大きい程度と言える。

MB-U150 と MB-S120 を比較すると発熱速度は MB-S120 の方が僅かに小さい程度であった。以上の傾向はコーンカロリメーターから得られた傾向と類似するが、コーンカロリメーターで見られたような S 系列の後半の着火による大きなピークは見られない。試験時間が 10 分と短いこともあるが、模型箱では場所により加熱の強度が大きく異なるため、一様加熱のコーンカロリメーターのように大きな発熱速度の変化が生じないためと考えられる。

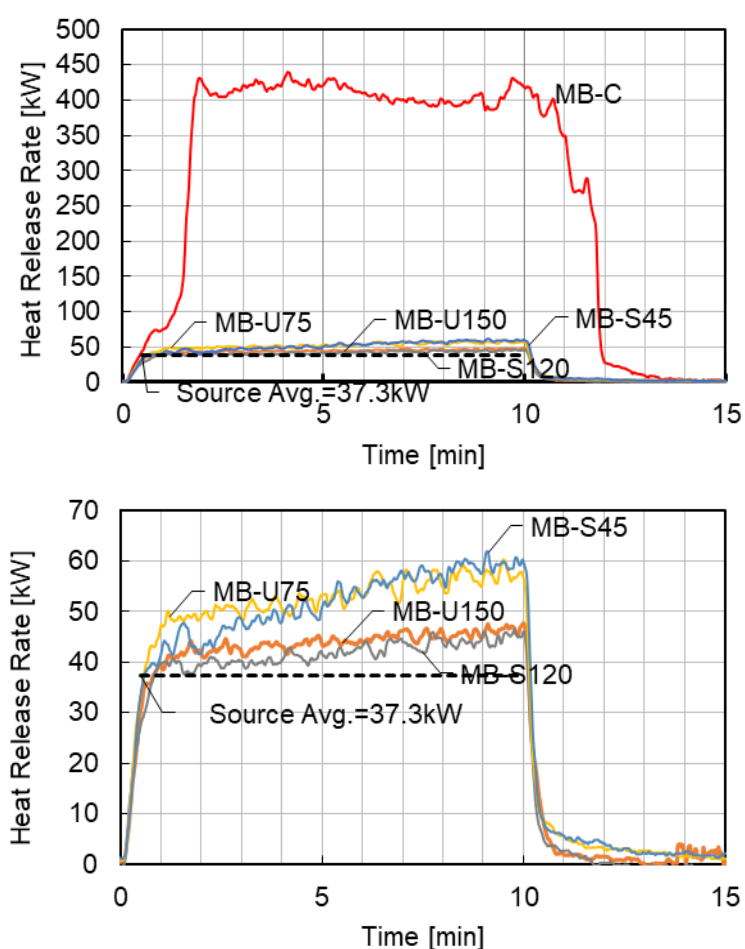


Fig. 3.3-24 Heat release rate evaluated by model box test

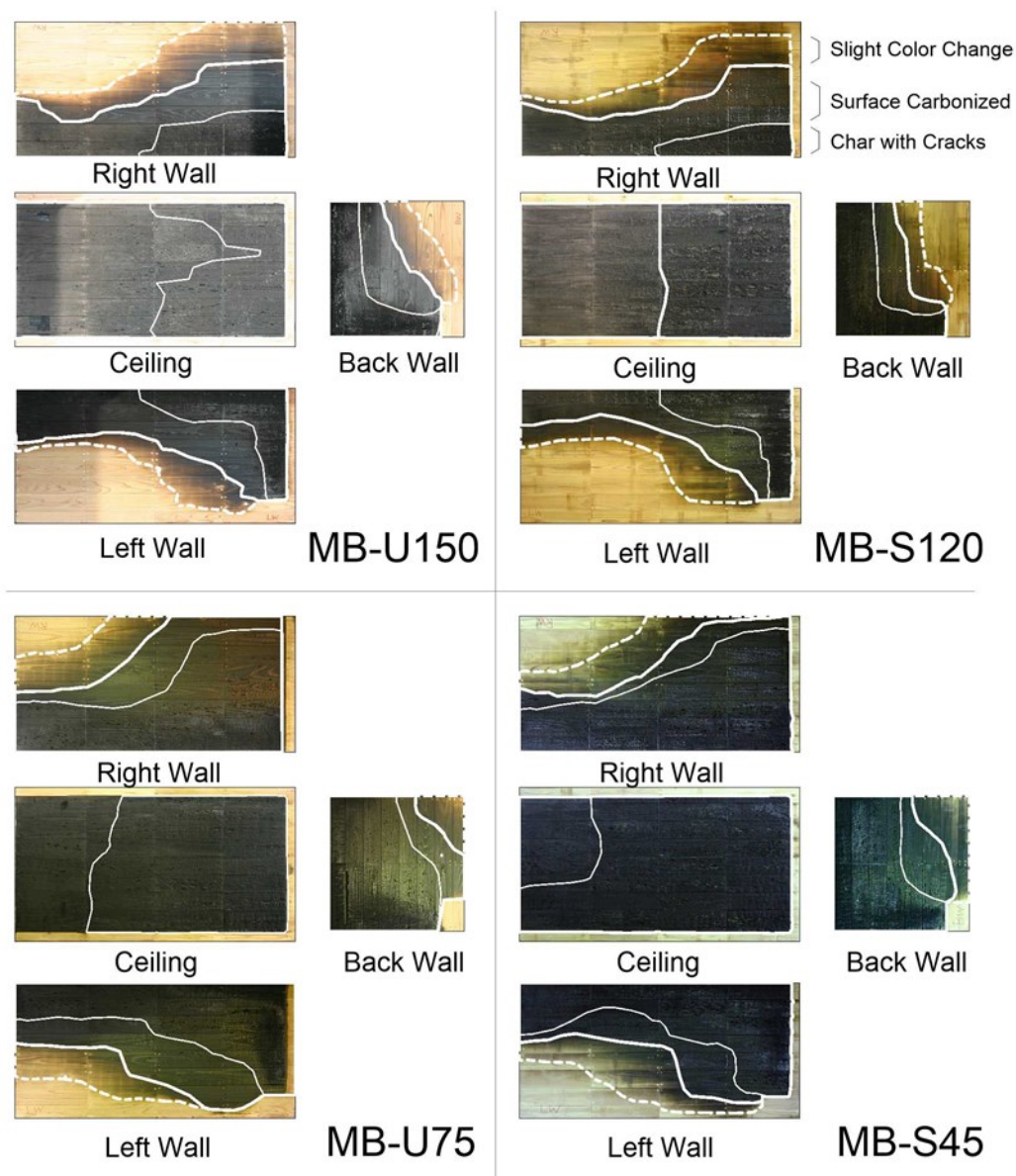


Fig. 3.3-25 Patterns of the burnt areas (model box test)

Table 3.3-2 Comparison of the burnt areas (model box test)

	Area[m ²]			
	MB-U150	MB-S120	MB-U75	MB-S45
— Char with Cracks*	1.11	1.36	1.86	2.53
— Surface Carbonized*	3.25	3.04	4.11	3.81
- - Slight Color Change*	3.94	3.69	4.6	4.47

*Correspond to white lines in Fig. 3.3-25

(3) 防火性能評価に対する試験法の影響

文献⁶においては、模型箱試験と発熱性試験を同一材料に適用し、前者の試験終了時の発熱の余裕度がコーンカロリメーターを用いた判定よりも大きくなることが明らかにされている。本研究でも、試験体が小型なことから防火性能評価試験で多用されるコーンカロリメーターにて実態と乖離なく等級付けが可能か検証を行う。

Table 3.3-3 Specifications of cone calorimeter specimens sampled from model box

Specimen	Sampled Board No.	Weight (Air-dried) [g]	Dimensions [mm]			Wood Density [kg/m ³]	Chemical Content [kg/m ³]
			Lengthial	Tangential	Radial		
MBc-U150	67A	104.69	100.24	100.53	18.04	429.1	146.8
MBc-S120	11B	66.558	100.4	100.4	17.99	286.3	80.7
MBc-U75	48A	77.78	100.26	100.54	18.08	333.6	93.2
MBc-S45	52B	74.2	100.25	100.47	18.16	360.4	45.3

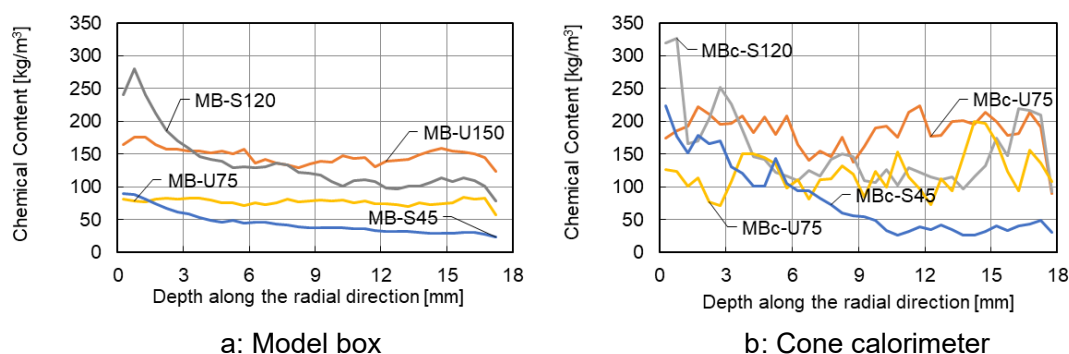


Fig. 3.3-26 Perpendicular profiles of chemical distribution within specimens

模型箱試験体の天井部分に用いた挽板の板厚方向の薬剤分布(Fig. 3.3-26a)に一致する挽板を選別してコーンカロリメーター試験を行った。選別した挽板の板厚方向の薬剤分布を Fig. 3.3-26b に、試験体の諸元を Table3.3-3 に示す。なお、MBc-S120 については薬剤の分布と量の両方の傾向に一致する挽板がなかったため、薬剤が表面へ集積している状態であることを優先的に選別した。各試験体の発熱速度の推移を Fig. 3.3-27 に示す。

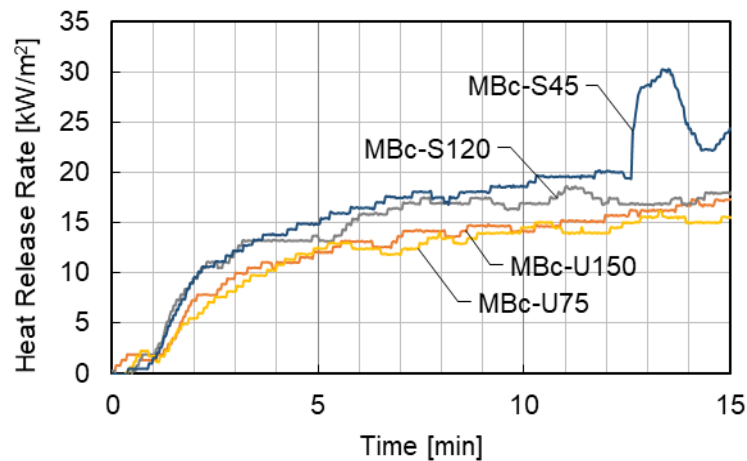


Fig. 3.3-27 Heat release rate in cone calorimeter

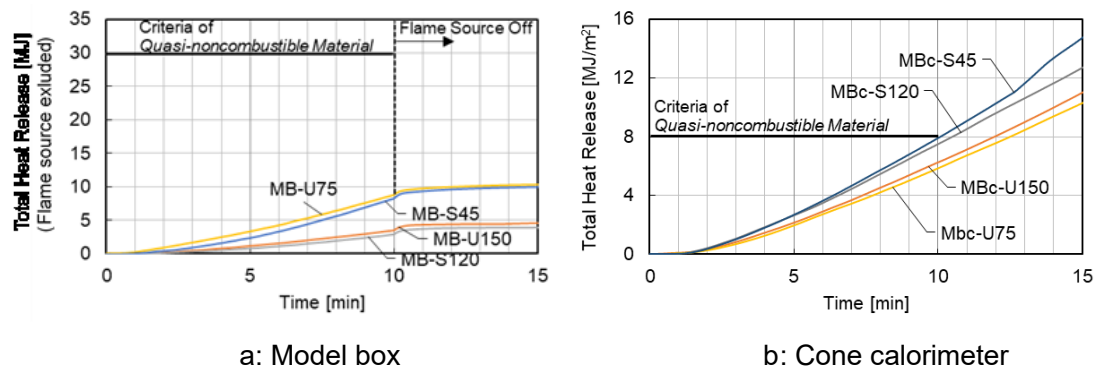


Fig. 3.3-28 Total heat release

総発熱量について試験法の比較を行う。Fig. 3.3-28a は、模型箱実験の結果から火源の平均発熱速度 37.26kW を差し引いた総発熱量である。Fig. 3.3-28b はコーンカロリメーターで得られた加熱開始 15 分までの総発熱量である。

模型箱試験による防火性能評価における発熱性の基準は、準不燃性能の場合の発熱性、火源の寄与分を除いた 10 分間の総発熱量が 30MJ 未満であることとされている³。本結果から、全ての試験体は準不燃性能を満たした。特に、MB-U150、MB-S120 と平均薬剤量の多い 2 体において余裕度が高い結果となった。10 分間の総発熱量は、MB-C : 191MJ 、MB-S45 : 8.2MJ 、MB-U75 : 8.7MJ 、MB-S120 : 2.9MJ 、MB-U150 : 3.5MJ となっており、薬剤量を考慮しつつ S と U 系列を比較すると、模型箱においても S 系列の防火性能が高い結果となった。

コーンカロリメーターによる防火性能評価における発熱性の基準は、準不燃性能の場合 10 分間の総発熱量が 8MJ/m^2 以下、不燃性能の場合 20 分間の総発熱量が 8MJ/m^2 以下であることが求められる。本結果を照らし合わせると、いずれも準不燃性能の基準値を満たすが、加熱 13 分までに総発熱量が 8MJ/m^2 を超えていることから、不燃性能を満たさない

ことが分かる。

よって、いずれの試験法によっても、本検討で製作した難燃処理木材は準不燃材料と判定される結果であり、試験法間で防火性能評価は一致する結果となった。

一方で、各試験体の発熱の大小関係や判定基準までの余裕度は試験法によって大きく異なる結果と言える。つまり、U75 と S120 および S45 の発熱の大小関係が入れ替わっており、薬剤量の不均一性の影響が模型箱試験よりも不利側に評価される傾向を示した。これは、換言すれば、コーンカロリメーター試験を行っておけば、薬剤の不均一性に対しては十分な検証を行ったと言えそうである。

このようになるのは第一に、強い加熱、または加熱を受ける時間が長いほどより深い位置の薬剤量が影響するためと考えられる。模型箱や実火災では、火源から離れると内装材への加熱も弱くなり、かつそういった弱い加熱の領域がかなりの割合を占める。弱い加熱しか受けない領域では、より室表面に近い部分の薬剤量が重要となるため、偏在する方が燃焼が抑制される結果となったと考えられる。

また、2つの試験法の間では熱慣性の寄与度が異なることも挙げられる。本検討で用いた難燃薬剤については発熱抑制に対する効果が指数的に減衰するために、コーンカロリメーター試験において主な評価対象となる発熱には薬剤量が過剰な部分における寄与よりも薬剤量が不足する部分での発熱増加が反映されやすいと言える。一方で、模型箱試験では難燃薬剤の量に応じた比熱の増加が、弱い放射熱を受けるような領域での発熱を遅延、抑制したと考えられる。

3.3.5 まとめ

リン酸系薬剤で処理された難燃処理木材について、薬剤の量および分布が既知の試験体に対するコーンカロリメーター試験、模型箱試験を行い、以下を明らかにした。

- ・薬剤の不均一性を抑制した試験体に対するコーンカロリメーター試験の結果、 50kW/m^2 の外部輻射下での着火抑制に必要な薬剤量は、カルバミルポリリン酸を主成分とする薬剤の場合 $23\sim 42\text{kg/m}^3$ の間に存在する。
- ・難燃性能を目標とする製品と同程度の薬剤量で薬剤の分布を異ならせた試験体を調製してコーンカロリメーターでの燃焼性を比較した結果、薬剤量が少ない側が加熱面となる場合に限って発炎燃焼が生じた一方で、非加熱面に薬剤量が少ない面が露出することは最大発熱速度や総発熱量に影響しない結果であった。また準不燃材料を目標とする製品と同程度の薬剤量で薬剤の分布を異ならせた試験体を調製してコーンカロリメーターでの燃焼性を比較した結果、薬剤が偏在しても発熱の特性値は変化しないか、偏在する方が抑制される結果であった。この 2 点から、流通する難燃処理木材の薬剤量を確保した上で生じる材の吸放湿に伴った難燃薬剤の材表への析出は、美観などの火災安全性以

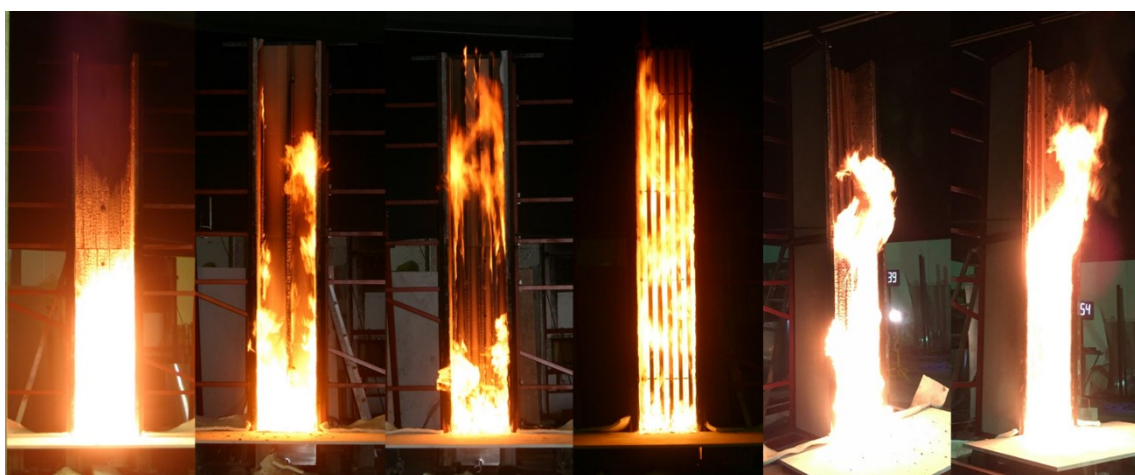
外の懸念はあるものの、製造時に期待した防火性能を担保する目的に対しては問題にならないと考えられる。

- ・ 準不燃および難燃性能として流通する難燃処理木材とはほぼ同等の薬剤量とした試験体を用いて行った模型箱試験の結果から、いずれのカテゴリを目標とした難燃処理木材においても、火災初期 10 分は材表に薬剤が偏在する方が区画内温度、発熱とも抑制される傾向にあった。材表方向への薬剤の集積は、初期の避難安全に対して問題とならないと考えられる。
- ・ 薬剤が材表に集積した材について、コーンカロリメーター試験の 10 分以前では均一に薬剤が分布する場合と差異が認められない一方、実火災に近い模型箱試験では安全側の結果であったことから、品質管理を行う上では、コーンカロリメーターによって性能を確認することで、実火災ではより安全な状況を保証できるといえる。

文 献

- 1 (公財)日本住宅・木材技術センター：難燃薬剤処理木材の品質管理基準等の検討 事業報告書 (2018)。
- 2 国土交通省報道発表：不燃木材に関する不燃材料の大臣認定仕様との不適合について、https://www.mlit.go.jp/report/press/house05_hh_000251.html, (最終閲覧日 2020.1.1)。
- 3 (一財)建材試験センター：防耐火性能試験・評価業務方法書, 51-67, <https://www.jtccm.or.jp/portals/0/resources/jtccm/seino/siryo/houhousho/boutaika.pdf>, (最終閲覧日 2018.12.11)。
- 4 上川大輔, 原田寿郎：難燃薬剤処理木材中のムラの発生要因に関する研究, 第 66 回日本木材学会大会研究発表要旨集, 240 (2016)。
- 5 (一財)建材試験センター：防耐火性能試験・評価業務方法書, 51-67, <https://www.jtccm.or.jp/portals/0/resources/jtccm/seino/siryo/houhousho/boutaika.pdf>, (最終閲覧日 2018.12.11)。
- 6 長谷見雄二, 吉田正志, 棚池裕, 田坂茂樹, 斎藤文春：改訂模型箱試験による内装材料の火災安全性評価、日本建築学会技術報告集 5 (9), 129-132 (1999)。
- 7 上川大輔、高瀬椋、松永浩史：難燃処理木材中の薬剤分布の偏りの発生要因について。日本木材保存協会年次大会研究発表論文集 34, 122-123 (2018)。

第4章 壁面ルーバーの燃焼性状および防火的措置



4.1	目的および概要	4-3
4.1.1	目的	4-3
4.1.2	概要	4-4
4.2	ルーバーの燃焼拡大性状の基礎的把握	4-5
4.2.1	実験および解析の位置づけ	4-5
4.2.2	実験	4-6
(1)	試験体	4-6
(2)	平面形状のパターン	4-7
(3)	計測項目	4-7
(4)	火源	4-10
4.2.3	分析方法	4-13
(1)	燃焼の指標	4-13
(2)	火炎高さの計測方法	4-13
(3)	対向する羽板の形態係数	4-16
4.2.4	実験結果	4-18
(1)	平面形状と燃え止まり高さ	4-18
(2)	火源発熱速度の影響	4-18
(3)	対向面からの入射熱の影響の実験的評価	4-21
4.2.5	考察	4-22
(1)	平板とルーバーの入射熱分布の差異およびその要因	4-22
(2)	羽板温度の定式化の可能性	4-24
(3)	既燃部の燃焼に対する相互放射の影響	4-26
4.3	実大・幅方向縮小実験（実験Ⅱ・Ⅲ）	4-29
4.3.1	実験方法	4-29
(1)	装置の構成	4-29
(2)	実験条件	4-29
(3)	計測項目	4-29
4.3.2	試験体	4-32
(1)	不燃材の壁面（実験条件の検討用）	4-32
(2)	シリーズⅡ：実大ルーバーおよび平板	4-32
(3)	シリーズⅢ：底の防火的効果の検証	4-33
4.3.3	加熱条件の検討	4-38
4.3.4	実験結果と考察	4-45
(1)	平板および実大ルーバーの燃焼性状	4-45
(2)	火災安全性予測に対する要素実験の有効性	4-51
(3)	実大ルーバーの発熱性	4-53
(4)	難燃処理の効果（Ⅱ-P48, Ⅱ-P48-fr）	4-58
(5)	燃焼抑制に対する底の効果	4-61
4.4	まとめ	4-64

4.1 目的および概要

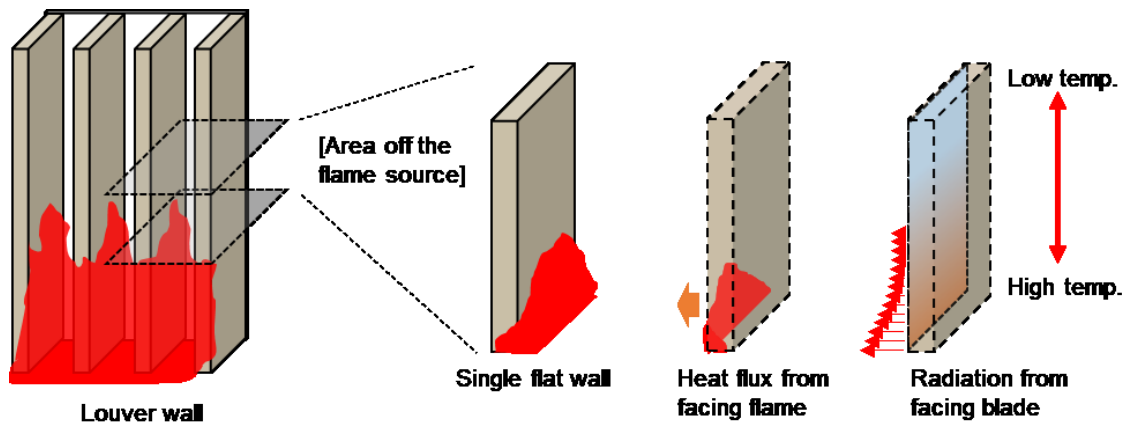


Fig. 4.1-1 Possible thermal factors in the burning process of louver wall

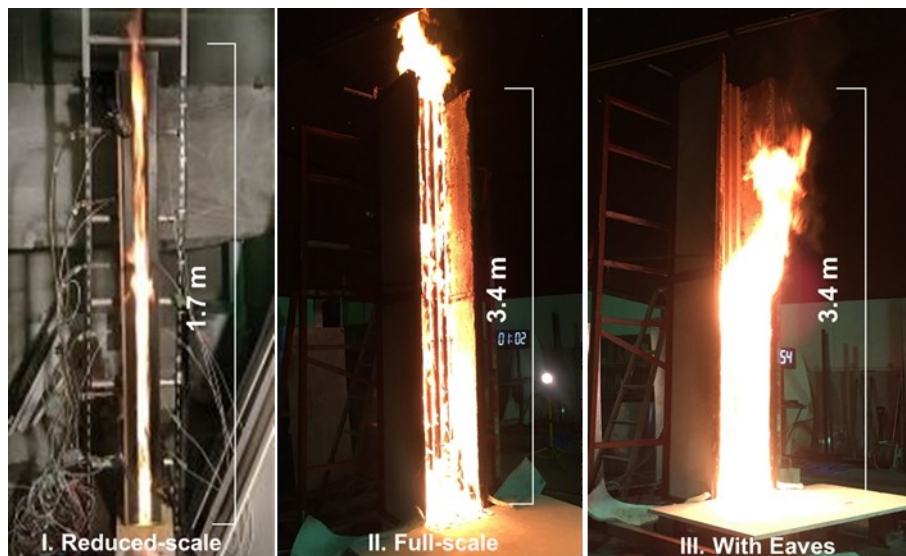


Fig. 4.1-2 Experimental schemes

4.1.1 目的

2 章および 3 章では、難燃処理木材の品質管理において問題となっている薬剤の偏析や白華を取り上げ、材表への薬剤の集積や屋内環境での白華等については火災危険につながりにくいことを示した。他方、水掛かりや結露が生じうる環境下での長期使用における耐候性や、その評価方法については未だ多くの課題が残されている¹⁻⁵。

加えて、こうした半屋外、屋外空間では意匠性、視線の制御、採光などの要件からルーバー状の木製架構が採用されることも多いが、これらは、表面積が大きいことや、可燃の面同

士が向かい合った状態(Fig. 4.1-1)である点において、平坦な壁面にはない燃焼の促進要因をもつ。平坦な壁面の燃焼性に関する実験的・理論的研究⁶⁻¹⁰などと比較すると、こうした立体形状の影響について直接的に検証した例は少ない。

ルーバーを溝付きの壁面と捉えた場合には菊地らの文献¹¹が参照できる。木材に溝を切ることで燃え止まり高さは上昇した一方で、持続火炎伝播には至らなかったことが述べられているが、溝の寸法に対する検討を主眼としているものではないため、溝の幅に対して奥行が増した場合に持続火炎伝播が生じる可能性を否定するものではない。また、ルーバーのように絶対寸法が大きくなるにつれて、溝内を通過する火炎の厚みが増せば、間歇火炎の到達域などにおける加熱は強まると予想され、持続火炎伝播の原因となりうる。

本章では、火災時に燃焼拡大し易いと想定される鉛直ルーバーを火源近傍で燃え止まらせるための条件を明らかにするために、羽板の奥行とピッチ、或いはそれらにより決定される溝のアスペクト比と持続火炎伝播の関係を整理した。この結果、火源近傍で燃え止まらなかったものについて、不燃材による庇を設けた場合の防火的効果の実証実験を行った。

4.1.2 概要

実験は Fig. 4.1-2 に示すように、Ⅰ：ルーバー羽板の要素実験、Ⅱ：火源近傍を想定した実大・幅方向縮小実験、Ⅲ：防火的措置の検証実験、の3段階に分けて行った。ルーバー形状の木製架構が平坦な壁面と比較して燃焼性が高いと考えられる要因には、表面積が大きくなりやすいこと、羽板が3面加熱を受けること、可燃面同士が向かい合う形状であること(Fig. 4.1-1)等が挙げられる。中でも、可燃面が向かい合う形状であることは未燃部への予熱を促進し、持続火炎伝播に発展させる可能性がある^{10, 12}。そこで、Ⅰ：ルーバー羽板の要素実験は、羽板間の溝1スパン分を抜き出し、ごく小規模な火源からの燃え拡がり进行评估することで、火源火炎高さに対する燃え止まり高さの比を実測した。Ⅱ：実大・幅方向縮小実験は、家具の燃焼程度まで成長した火源からの燃え拡がり进行评估することを目的に実施した。

上記2つの実験は基本的に、背面に不燃の壁面があるルーバーを想定して行った。さらに、火源近傍で燃え止まらないものについては不燃材による張り出し(以下、庇と呼称する)を付加してⅢ：防火的措置の検証実験を行った。このとき、ルーバー特有の特性として、壁面に直付しないルーバーではルーバー面でのコアンダ効果が単なる壁面よりも小さいと考えられたため、ここでは背面に壁面があるもの、壁面との間に空間を設けた場合での庇の効果を比較する検証実験を行った。

4.2 ルーバーの燃焼拡大性状の基礎的把握

4.2.1 実験および解析の位置づけ

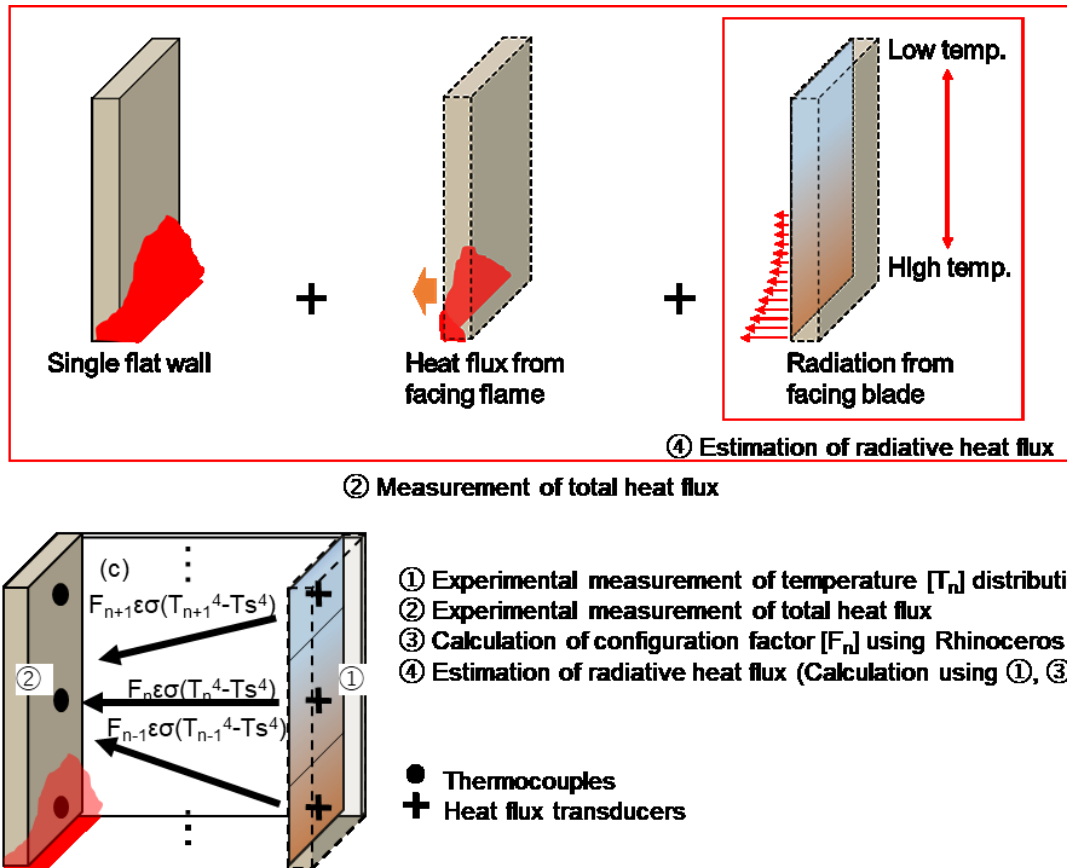


Fig. 4.2-1 Schemes of evaluating the configuration effect

本研究の想定するルーバーにおいて、特に間歇火炎が到達する程度の領域における特異性は、平板と同様に板材の表面に火炎が存在することに加えて、温度が上昇した対向面からの放射による熱取得や火炎由来の熱取得が存在することと予想される(Fig. 4.2-1)。本検討では、実験的に計測可能な羽板の温度分布①より対向面との放射による熱収支④を検討し、全入射熱の実測値②と比較する。

火炎からの熱移動のうち、放射成分の強度に由来する火炎の放射率 ε は火炎厚さ L と放射吸収係数 k を用いて Lambert-Beer の法則(1)式により推定される (Fig. 4.2-2)。なお、輻射吸収係数 k については木材クリブでの値 (Drysdale ら¹³) を用い、対照としてメタノール (Mudan ら¹⁴) についても併記する。本実験で検証したのは火炎厚さが最大でも 100mm 程度のオーダーであり、対向面との放射による熱の授受に対して、火炎による遮蔽の影響は小さいと考えられる。

$$\varepsilon = 1 - \exp(-kL) \quad \text{-----} \quad (1)$$

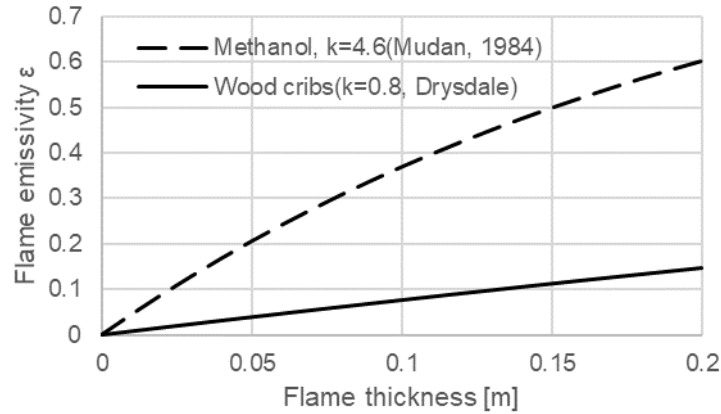


Fig. 4.2-2 Emissivity of wood crib flame

そこで、本実験を温度勾配のある平板から放射加熱を受ける状況とみてモデル化し、実測した温度から対向面からの放射の寄与分 E_w を(2)式により逆算した。

$$E_w = \sum F \varepsilon \sigma (T^4 - T_s^4) \quad [\text{kW/m}^2] \quad \text{-----} \quad (2)$$

ただし、 F : 各部の形態係数、 ε : 放射率、 σ : Stefan-Boltzmann 定数 $5.667 \times 10^{-11} [\text{kW/m}^2\text{K}^4]$ 、 T : 実験により測定された 250mm 間隔の羽板温度[K]、 T_s : 受熱部温度[K]。 ε については放射温度計測において推奨されている設定放射率が、木材の場合 0.86~0.95¹⁵、¹⁶、木炭の場合 0.96¹⁷であることを踏まえつつ、妥当性の検証が容易になるよう $\varepsilon=1$ とした。 T_s は熱流束計の先端部を仮定し 333K とした。各部の形態係数の算出過程については 4.2.3(3)にて詳細を述べる。

4.2.2 実験

(1) 試験体

試験体は、ルーバー羽板間の溝を部分的に再現したものとして、Fig. 4.2-3 の構成とした。対向する 2 面に燃焼を限定し、試験体の実験中の崩落を防ぐために、板材を軽溝形鋼で裏打ちしている。試験体の高さは、目地等を設けずに施工可能であることを要件として 1700mm とした。評価対象とする材料は、熱物性値の不均一性を排するため MDF(中密度繊維板)を用い、MDFにて燃焼性状が顕著に異なった数仕様については、スギでの検証も行った。板厚もルーバーにおける燃焼性状に影響し得るため、ここでは下記を考慮して 18mm と設定した。

すなわち、熱浸透深さとして、初期温度からの温度上昇が材表における温度上昇の 9% とする深さ¹⁸を(3)式より求めると、板厚 18mm では 9.6 分まで半無限固体として扱える結果

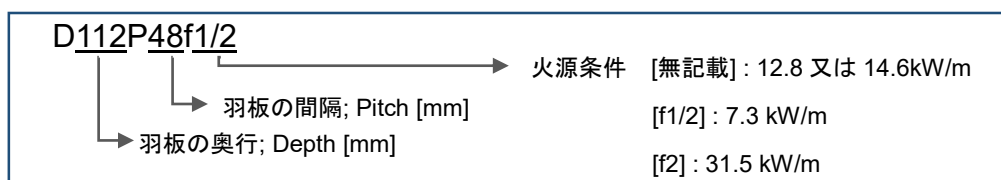
となる。また 3 章の実験結果によれば、板厚 18mm のスギの場合で、50kW/m² 加熱下の発熱性試験において加熱開始後およそ 7 分で 2 次ピークが発生し、同時に熱分解する領域が増加し始めることを示唆していることから、本実験における火源近傍の木材は、加熱開始 7 分程度までを熱的に厚い状態と見做せると考えられる。

$$\ell = 2(\lambda t / \rho c)^{1/2} \quad \text{-----} \quad (3)$$

ただし、 ℓ は熱浸透深さ[m]、 λ は熱伝導率[W/m・K]、 t は時間[s]、 ρc は容積比熱[J/m³・K]。MDF の物性値は、 $\lambda = 0.12$ [W/m・K]、 $\rho c = 820$ [J/L・K] を用いた¹⁹。

(2) 平面形状のパターン

試験体名は以下の要領で D112P48f1/2 のように表記する。



羽板の奥行は、流通する製材から製作可能と考えられる 120mm 程度を目安に、溝形鋼の内法に合わせて 112mm と 54mm の系列を設定した。実験は、羽板単独での燃焼実験 D112、D54 に加え、D112 系列で幾つかピッチを変化させた実験を行った。それらの中で燃焼性状が顕著に異なった平面形状を中心に、絶対寸法を縮小した実験を行った。これは、火炎伝播性状に対して、対向する壁面との放射による熱収支の影響が支配的であるならば、溝の奥行 Depth とピッチ Pitch の比（以降、D/P 或いはアスペクトと呼称）が同一のルーバーは、片側の羽板からみた対向面の形態係数が同一となり、燃焼性状も相似的になると考えられたためである。

試験体は 1 ヶ月間、23℃50%RH の恒温恒湿室で養生したのち実験に供した。MDF は絶乾密度 601kg/m³、含水率 8.0% で、スギは絶乾密度 260～378kg/m³、含水率 8.4～9.8% であった。また、火炎伝播の生じた仕様について、対向面を定温壁（鋼製、水冷）に置き換えてピッチを 1/2 にした仕様が D112CW (Fig. 4.2-4b～d) である。

(3) 計測項目

試験体の表面温度および入射熱流束を羽板の中央軸上、高さ方向に 250mm 間隔で、試験体の下端から 250mm を起点に各 6 点計測した。向かい合う 2 面のうち、片方で温度測定、もう一方で熱流束の測定を行っている。また、D112CW および D112、D54 においては熱流の計測位置を他仕様と揃え、熱電対を熱流束計の縁端から 15mm 下方に設置した。

温度計測には素線径 0.65mm の K-CA 熱電対を、入射熱の計測には φ25mm Gardon 型

熱流束計（測定レンジ 0～150kW/m²）を用いた。熱電対は計測点より 20mm 水平に試験体表面を這わせてから試験体裏面方向に抜き、熱流束計はセンサー部の表面が試験体表面に揃うよう、試験体にφ26mm の下穴を開け、裏面から挿入した。

火炎高さは、文献⁹等では、1 秒周期で読み取った火炎高さの平均値を L_f として用いているが、本研究では、火炎高さの時間推移が著しい結果が多かったことを踏まえ、以下の要領とした。60fps のビデオカメラで記録した映像から 5 秒ごとに伸縮の 1 周期分の画像を等間隔に 5 フレーム書き出し、画像解析ソフト上で火炎片の座標を拾い出した。解析ソフトは NIH(アメリカ国立衛生研究所)で開発されたオープンソースの画像処理ソフトである ImageJ²⁰を用いた。こうして得られた火炎の伸縮 1 周期の中の最大、最小、平均をそれぞれ L_m' , X_p' , L_f' と定義して表記する。これら手順の詳細および既往の手法と本検討の手法で計測した L_f , L_f' の関係の詳細については 4.2.3(2)で述べるように、 $L_f' = 0.98L_f$ の関係が得られている。

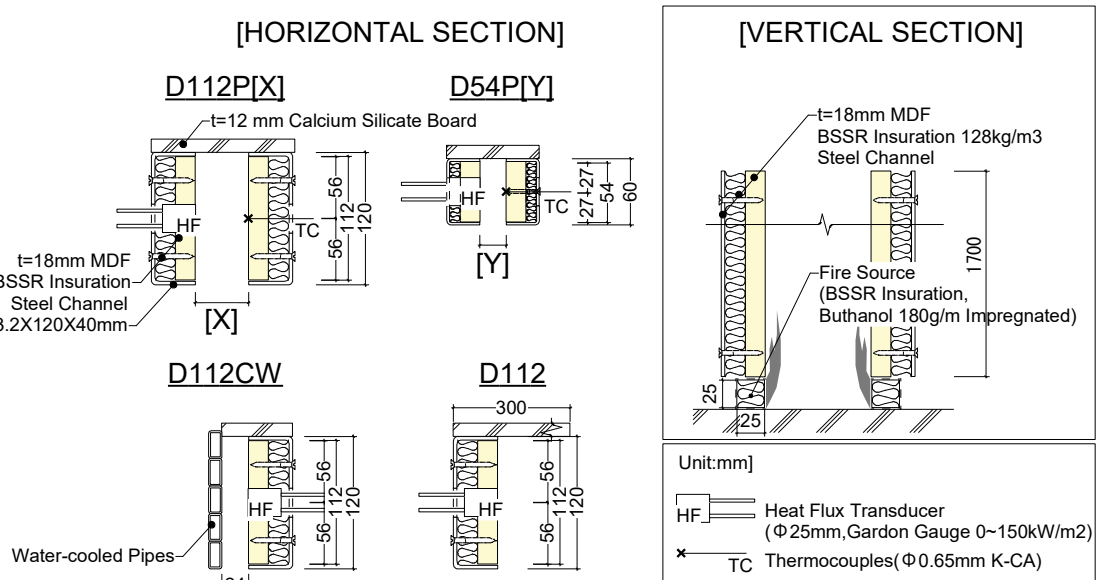
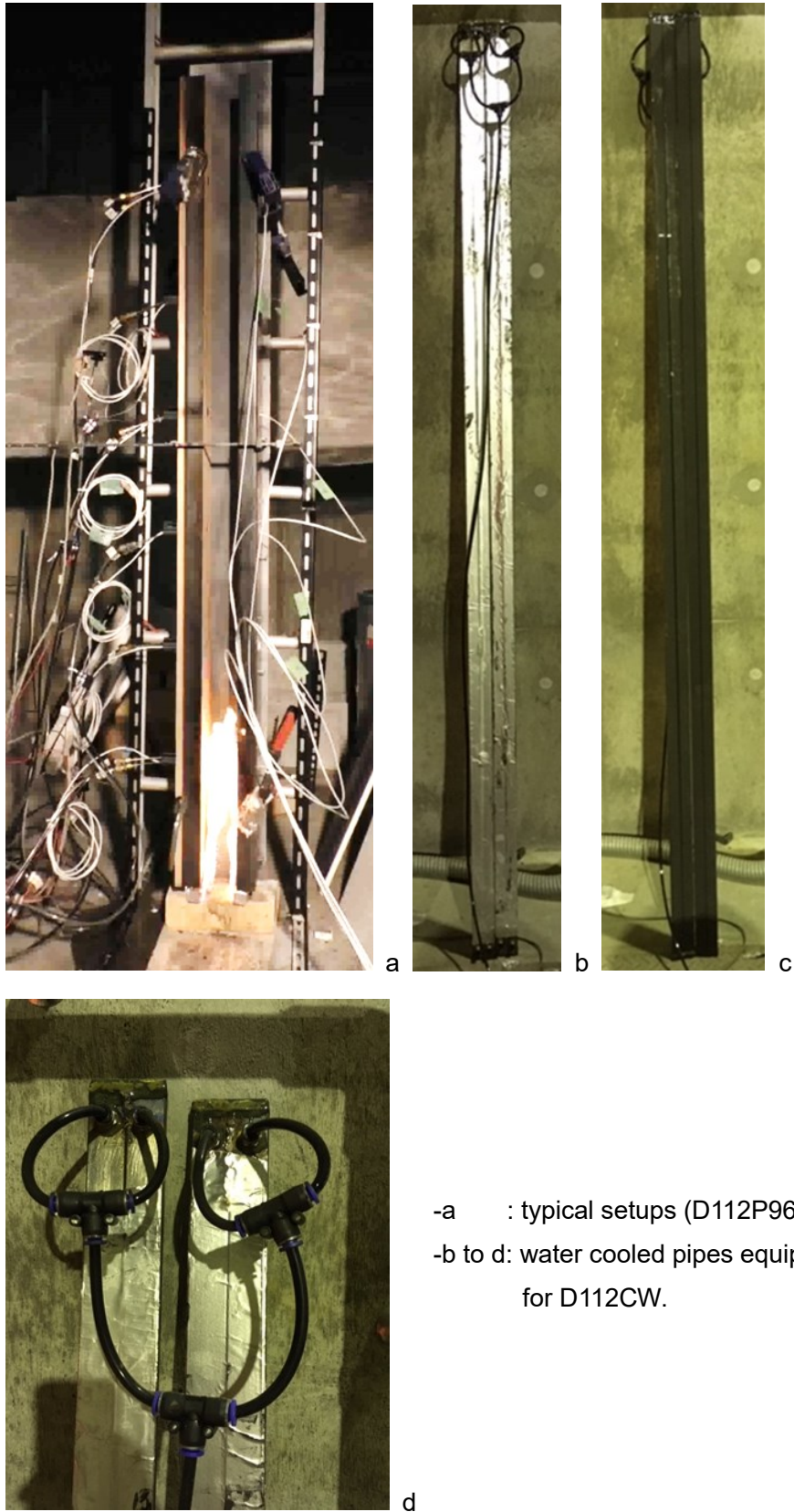


Fig. 4.2-3 Specimens for reduced-scale experiments



- a : typical setups (D112P96);
- b to d: water cooled pipes equipped for D112CW.

Fig. 4.2-4 Test apparatus

(4) 火源

平坦な壁面の燃え止まりについては持続火炎伝播の発生有無や火源火炎高さ X_{po} と燃え止まり高さ X_{poff} の比 X_{poff}/X_{po} の評価に縮小実験が有効であることが示されており、 X_{poff}/X_{po} は、火源火炎高さが 0.05～0.4m の範囲で概ね一定であることが明らかにされている¹²。同様に、3.6～18.5kW/m の範囲において、火源の発熱速度は持続火炎伝播の有無には影響しないことも明らかにされている¹⁰。本検討のような凹凸形状を有する壁面の燃え止まりを予測する際の縮小実験の有効性はこれまでに確認されていないが、火源となる火炎高さが大きい条件で持続火炎伝播の発生有無を判断することは困難であるので、まずは上記の範囲に包含される火源を用いて平面形状と燃焼性状の関係を把握する。

Table 4.2-1 に実験に用いた火源の概要を示す。火源には 25×25×56mm（ピッチ×高さ×奥行）のセラミックファイバーウールにブタノールを 10g（約 180g/m）含浸させ、噴出面以外を金属箔により被覆したものを基本単位とした。これを火源 A と呼称する。また、羽板の奥行が異なる仕様同士で口火火炎高さを揃えるため、羽板の単位長さあたりの火源発熱速度を揃え、火源幅を 2 倍の 112mm とした火源 B、加えて一部仕様に対しては火源発熱速度の影響を確認するために、火源面の高さ方向の寸法を火源 A の 2 倍の 50mm とした火源 C も用いている。

これらの火源の燃焼性状については、放射加熱を切った状態のコーンカロリメーターを用いて把握した(Fig. 4.2-5)。Fig. 4.2-6 の通り、火源 A は点火後およそ 6 分間は加熱時間とともに発熱速度が増加し、点火 0.6 分で 10 kW/m、点火 6 分で 15kW/m（平均 12.8kW/m）の発熱速度で燃焼した。さらに、火源 A について 4 回計測して再現性を評価したところ、発熱速度の変動は±6%程度であった。また、火源単体を Fig. 4.2-7 に示すような入隅で燃焼させ、火源単体の火炎高さを計測した。それぞれの火源について、火炎高さの推移を Fig. 4.2-8 に示す。

Table 4.2-1 Specifications of flame sources

	Dimension			Amount of Buthanol	X_{po} [mm]	Average Heat Release* [kW/m]	Maximum Heat Release [kW/m]
	Pitch	Depth	Height				
A	1	25	56	10g [180g/m]	115	13.2	15.2
	2					12.6	14.4
	3					13.5	15.7
	4					12.0	13.6
B	25	112	25	20g [180g/m]	128	14.6	15.9
C	25	56	50	20g [360g/m]	180	31.5	35.2

*Average from 60 to 360sec.

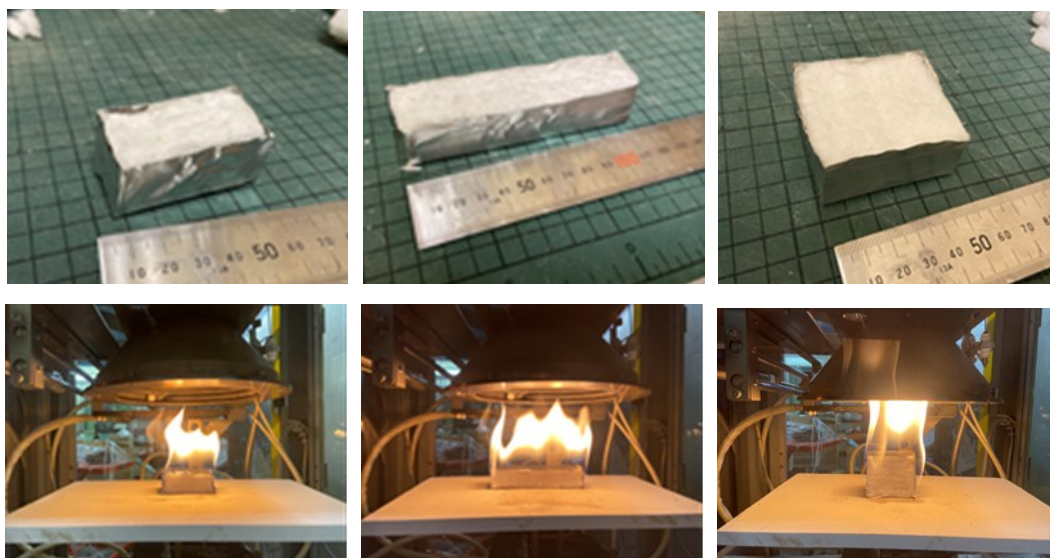


Fig. 4.2-5 Heat release measurement of fire sources using cone calorimeter
Left: source A, center: source B, right: source C

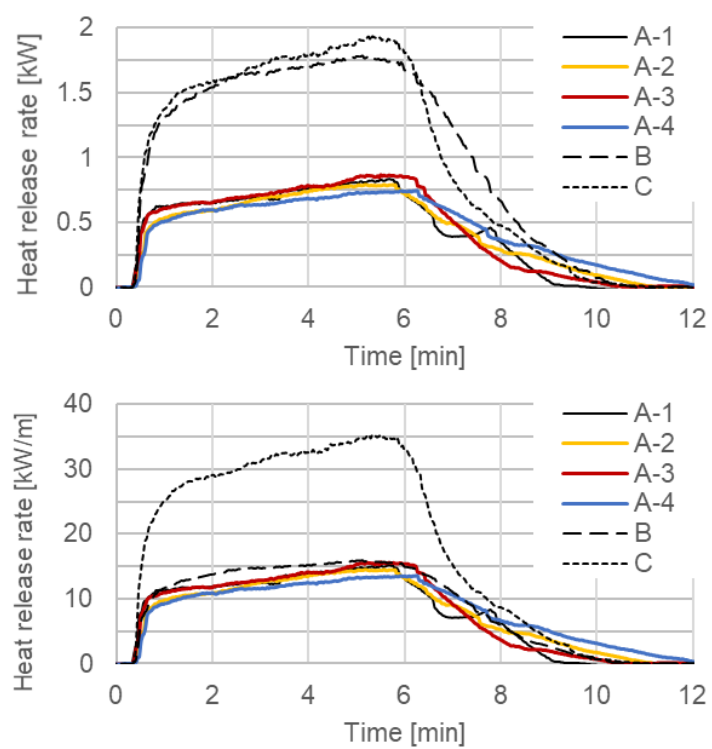


Fig. 4.2-6 Heat release profiles of the fire source

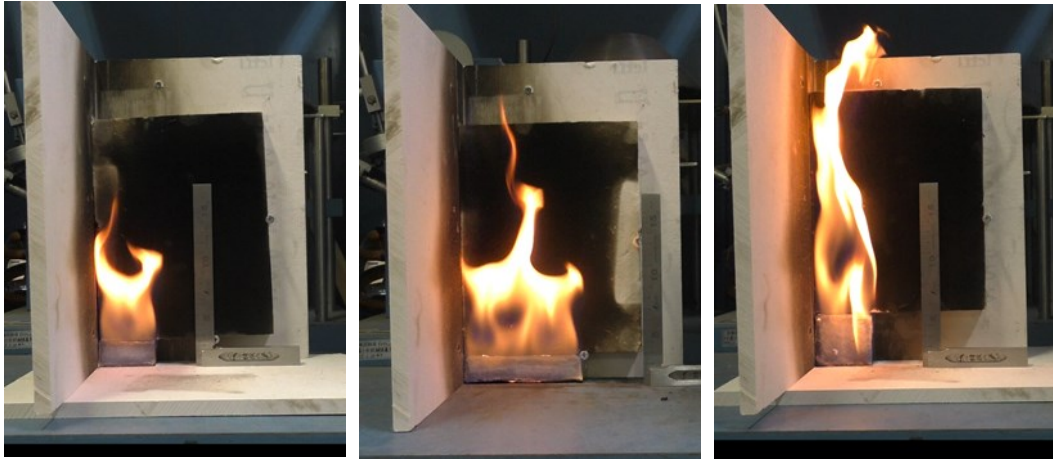


Fig. 4.2-7 Experimental setups for evaluating flame height of the source
Left: source A, center: source B, right: source C

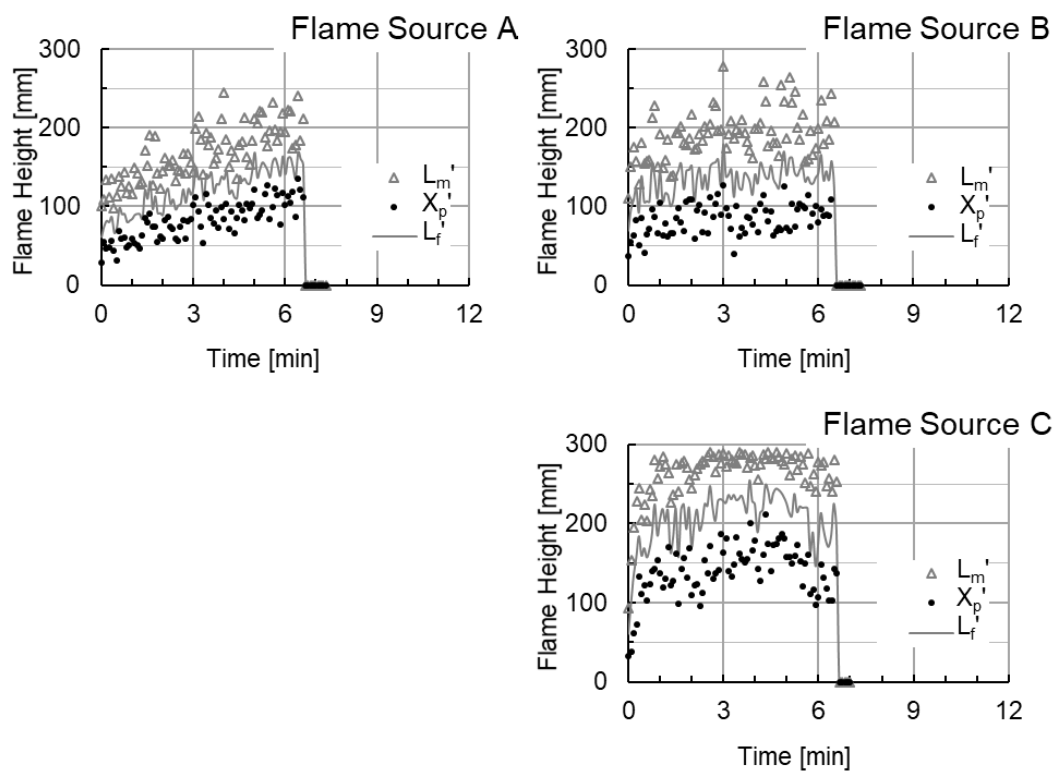


Fig. 4.2-8 Flame height of each source

4.2.3 分析方法

(1) 燃焼の指標

定常加熱を受ける木材の着火限界熱流束について、鉛直面では水平面の約 1.15 倍程度の放射熱が必要であることが報告されている²¹。水平上向き・定常加熱では、13~20kW/m²の放射強度で着火することが実験的に確認されており²²、本検討のような鉛直面の場合、15kW/m²の放射加熱下で着火することが確認されている²³。また着火時間を問わない場合、同文献より、着火限界となる入射熱流束は 10~12kW/m²であると推定されている。

一方で、上方火炎伝播過程の木材における着火には一律な指標が提案されていないが、これは、上方火炎伝播では入射熱・加熱時間の 2 値が非定常で変化するため、着火限界となる入射熱流束を数値として表現できないことに起因していると考えられる。

また着火温度についても、木材の場合には炭化が生じることに起因して一定値を取らないことが述べられている²⁴。さらに、熱分解領域から直接的に可燃性ガスが供給され、火炎が持続的に存在するようになる時点を以て熱分解領域の先端と判断することが妥当であること、これは入射熱流束の安定をもって評価できること⁹が示されている。そこで本研究では、温度・熱流束・目視による火炎高さ（ビデオ映像からの解析）の 3 指標を記録し、主な考察は目視による火炎高さに基づいて行った。

(2) 火炎高さの計測方法

本検討はルーバーを想定した検討であることに起因して、可燃の面が観察し難い場合が多く、熱分解領域の先端を目視観察することは困難であった。一方で、火炎の伸縮の 1 周期の中で、火源付近の燃焼に由来する火炎が退行した時点での火炎先端は、可燃物の表面から直接燃料を供給される状態で燃焼を維持していると考えられることから、その点の高さを以て熱分解領域の先端を近似的に評価できると考え、以下の要領で各時点の火炎片高さを評価することとした。

前処理として、試験体と正対する位置で撮影したビデオ映像を、ffmpeg²⁵（CC ライセンスにより改変・商用利用可能なフリーソフト）を用いてフレームごとに画像化した。書き出されたデータのフレーム率は 30fps であった。（ビデオカメラの公称値は 60fps であるが、フレーム書き出しの過程では連続 2 フレームに同一の画像が書き出されたため。）書き出した画像群は TIFF マルチファイル（複数画像を 1 ファイルに格納した形式）に変換した。変換したファイルを前述の ImageJ に取り込み、スケールを合わせた上で（ImageJ 上の Set Scale コマンド）、1 画像ずつ送りながら火炎片の高さをマウスクリックして、ROI マネージャーに取り込ませた。全画像について火炎片の抽出を終えたのち、計測（ImageJ 上の Measure コマンド）を実行して各フレームの火炎片高さを CSV 出力させた（Fig. 4.2-9）。

以上の手順で、各時点での火炎高さの傾向を反映する十分なフレーム率を把握するとともに、得られる火炎高さについて既往の手法により評価した L_f との整合を検証するために、仕様 D112P72 の実験開始 240～245 秒の 5 秒間の結果を使用して以下の予備検討を行った。なお予備検討の対象は、火炎の伸縮が顕著かつ火炎片がカメラの画角に収まっている時点であることを条件とした。

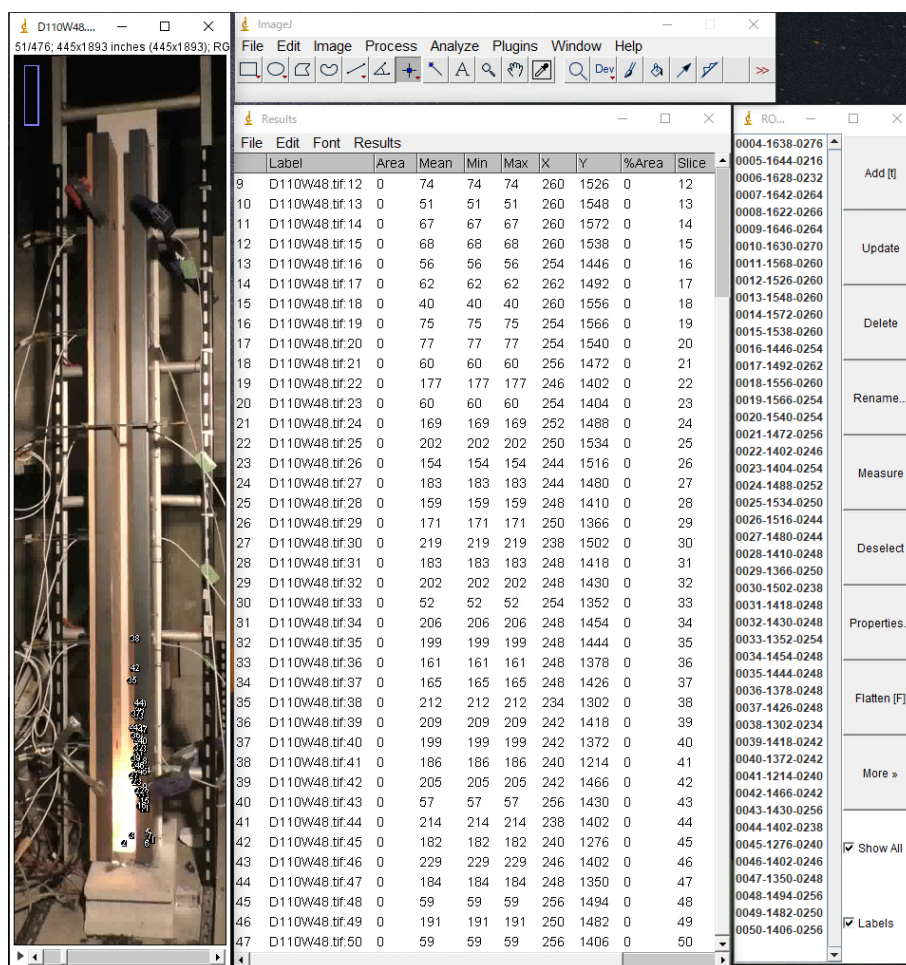


Fig. 4.2-9 Flame height measurement using ImageJ

Fig. 4.2-10 にフレーム率を 30fps,12fps と異ならせた画像群から得た火炎高さを示す。本実験の条件であれば、12fps 程度までフレーム率を下げてても全体の傾向は反映できることが確認された。さらに、12fps で取得した火炎片高さを火炎の伸縮 1 周期ごとに区切り、1 周期の中の最大、最小、平均をそれぞれ L_m' , X_p' , L_f' と呼称して算出した。

L_m' , X_p' , L_f' の計測結果を Fig. 4.2-11 の左に示す。さらに、文献⁹と同様に、1 秒間隔のデータ 5 点分を平均したものが Fig. 4.2-11 右の L_f である。これらより、 $L_f' = 0.98L_f$ の関係が得られ、既往の手法と本手法で得られる火炎高さに系統的な差異は殆ど無いことが確認された。そこで実際の分析では 5 秒ごとに、火炎の 1 周期分の画像データのみを解析することとした (Fig. 4.2-12)。なお本研究の計測法で得た火炎の伸縮の傾向が各 5 秒間の傾向を、どの程度反映するかという視点では、 L_f' が $\pm 9\%$ 、 X_p' が $\pm 6\%$ 、 L_m' が $\pm 13\%$ の相対標準偏差をもつ。 X_p' の相対標準偏差が他の指標と比較して小さいことは、火源付近の燃焼に由来する火炎が退行した時点で火炎が存在する最高点をもって熱分解領域の先端と見做すことの妥当性を、ある程度支持するものと考えられる。

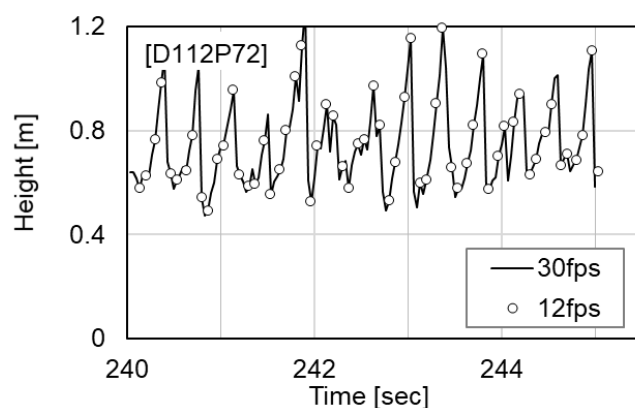


Fig. 4.2-10 Effect of frame rates on flame height measurement

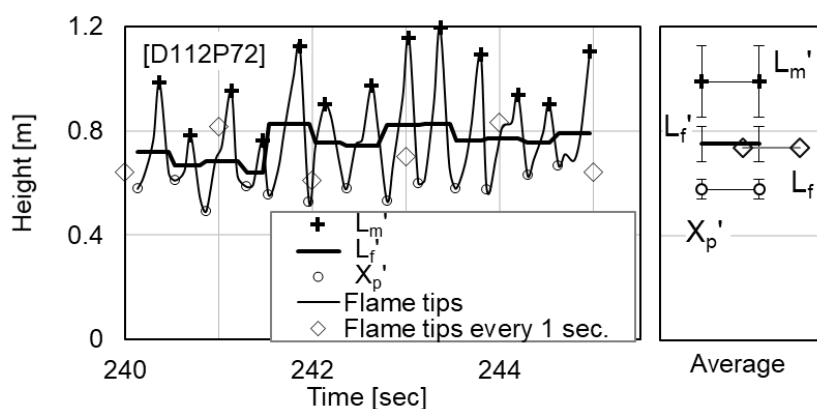


Fig. 4.2-11 Comparison of L_f , L_f' and their dispersion

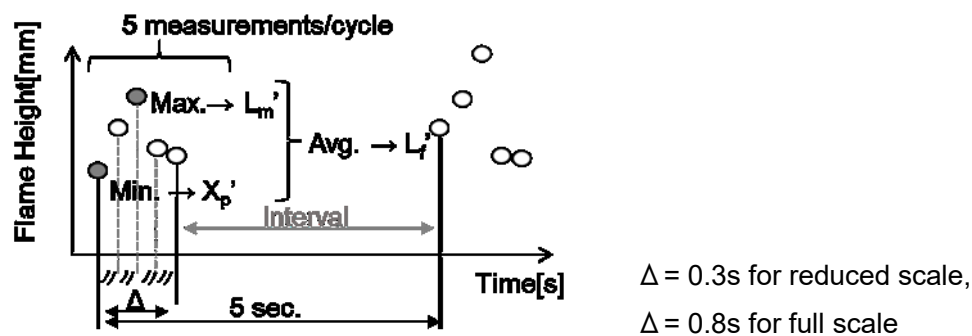


Fig. 4.2-12 The method for measuring flame height

(3) 対向する羽板の形態係数

Fig. 4.2-1 に示したフローの検討③に用いる、熱流束計から見た対向面の形態係数は、立体角投射則²⁶に基づいて図式的に求めた。算出は 3D モデリング、パラメトリックデザインに用いられる Grasshopper²⁷ (Robert McNeel & Associates) 内で組んだビジュアルプログラミングにより行った。

形態係数は、図的には観測点の天球における相手の見取り図²⁶と読み替えられる。つまり、相手の面を観測点に投射させ、観測点を中心とした半球上で投射像を得る。この半球をさらに垂直に投影し、全体に占める対象物の像の割合を算出すればよい。以上の操作をプログラミング内で行い、得られた形態係数を用いて、羽板温度の実測値から(2)式²⁸によって放射成分を逆算した。

例として、高さ 1,000mm の計測点からみた各要素の形態係数の算出結果を Fig. 4.2-13 に示す。同結果をシグモイドとして表現したものが**-b, d**で、**-a, b**が 100mm メッシュ、**-c, d**が 250mm メッシュで算出した結果である。**-b, d**から分かるように、平面的に相似なルーバーならば羽板全体の形態係数は同一となるが、本検討での高さ方向のメッシュ分割は実験と同様に 250mm に統一しているため、高さ方向の内訳は異なっている。

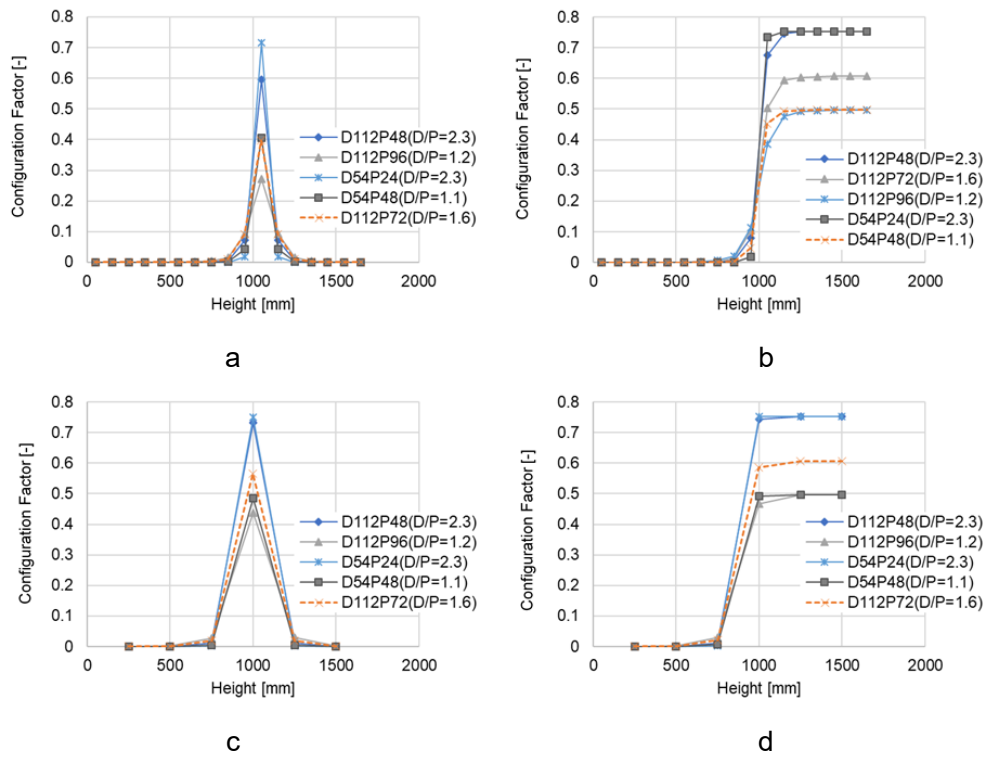


Fig. 4.2-13 Calculated configuration factor

-a 100mm pitch -b 100mm pitch, integrated value
 -c 250mm pitch -d 250mm pitch, integrated value

4.2.4 実験結果

(1) 平面形状と燃え止まり高さ

各実験の結果については巻末の資料編(1), (2)に付す。Fig. 4.2-14 に X_p' の推移で代表させた各試験体の燃焼の時間推移を示し、Fig. 4.2-15, Table 4.2-2 に要素実験の全結果の概要を示す。表中に、 X_p' の最大値を X_{poff} として表記し、4.2.2(4)で計測した火源火炎高さとの比を X_{poff}/X_{po} として併記する。また、これらの結果を溝深さとピッチのアスペクト D/P との関係で表現すると Fig. 4.2-16 のようになる。プロットに上向きの矢印があるものは試験体上端まで羽板自体からの発炎燃焼が認められ、燃え止まりが確認できなかったものである。 $D/P < 0.65$ では燃え止まり高さは羽板単独で燃焼させた場合の 1.3 倍程度であり、 $0.65 < D/P$ では、溝幅に対する奥行の増加に伴って著しく燃え止まり高さが増加する。さらに、 $1.5 < D/P$ かつ平面的に大きな D112 の系統では燃焼が加速的となるとともに、上方に到達して以降も発炎燃焼が継続する場合があった。

(2) 火源発熱速度の影響

D54P24 は D112P48 と平面的には相似形であるにもかかわらず、装置内で燃え止まったことから、火源発熱速度を 2 倍とした D54P24f2 も実施したが、燃え止まり高さの絶対値に影響が殆どなく、いずれも燃焼が装置内で収束する結果となった。

また D54P48 については、4.3 において述べる実大実験と傾向が異なって平板と同程度の高さで燃え止まったことから、火源発熱速度を 2 倍とした実験(D54P48f2)も実施した。この結果、両試験体とも燃え止まったものの、燃え止まり高さは火源火炎高さとの比で 4.0 程度異なった。反対に、D112P48 が、より小規模な火源によって火炎伝播に至るかについても検証を行った (D112P48f1/2)。上端に到達する時間は遅延したものの、装置内で評価可能な燃え止まり高さを上回った。

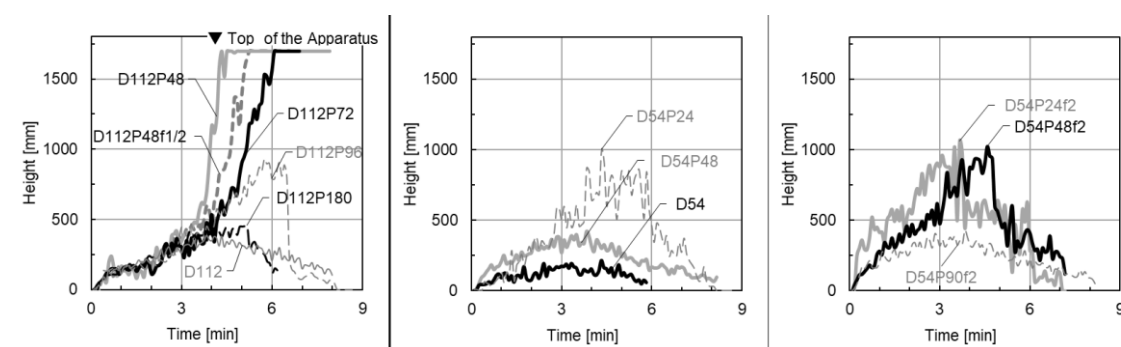


Fig. 4.2-14 X_p' heights in reduced-scale experiments

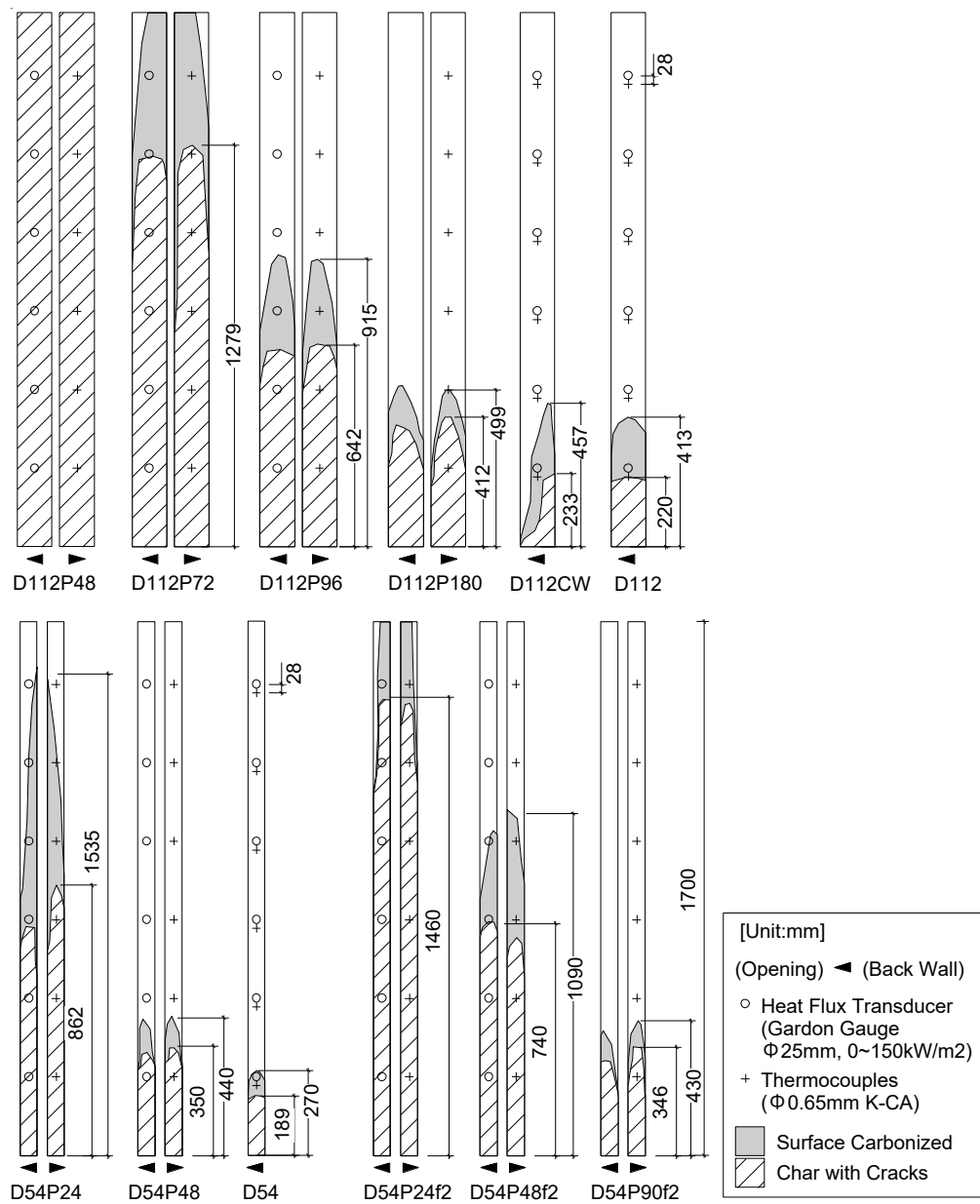


Fig. 4.2-15 Burnt specimens

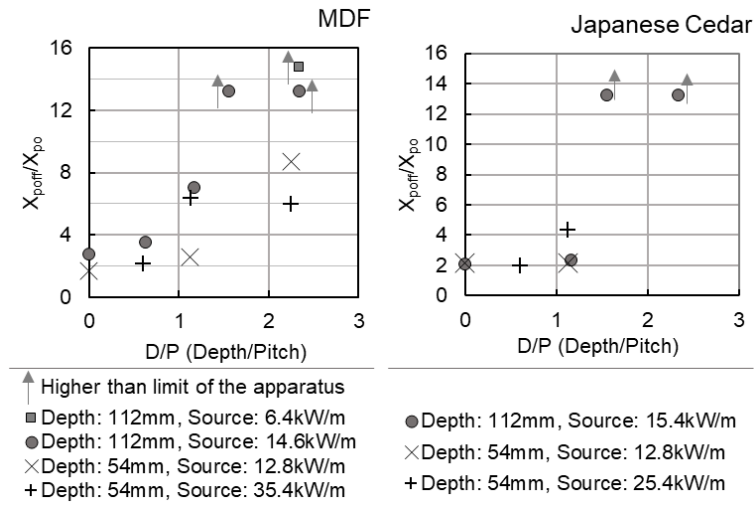


Fig. 4.2-16 Louver aspects and X_{poff} / X_{po}

Table 4.2-2 Summary of reduced-scale experiments

Specimen No.	Aspect D/P[-]* ¹	Flame Source* ²	X_{poff} / X_{po} [-]* ³	X_{poff} [mm]	$\max L_m'$ [mm]	Duration until Peak [sec]
D112	-	A	2.41	385	530	230
D112CW	-		2.23	356	640	215
D112P180	0.622		2.83	452	612	305
D112P96	1.17		5.62	899	1302	350
D112P72	1.56		>10.6	>1700	>1700	365
D112P48	2.33		>10.6	>1700	>1700	260
MDF D54	-	B	1.62	194	320	200
D54P48	1.13		2.44	293	562	205
D54P24	2.25		8.36	1003	1487	260
D112P48f1/2	2.33	B	>14.2	>1700	>1700	297
D54P90f2	0.600	C	2.16	345	576	195
D54P48f2	1.13		6.40	1024	1436	275
D54P24f2	2.25		6.02	963	1501	190
C-D112	-	A	1.69	270	428	159
C-D112P96	1.17		1.87	300	571	260
C-D112P72	1.56		>10.6	>1700	>1700	173
C-D112P48	2.33		>10.6	>1700	>1700	162
C-D54	-	B	2.08	250	353	150
C-D54P48	1.13		2.08	250	485	168
C-D54P90f2	0.600	C	2.24	359	606	100
C-D54P48f2	1.13		4.89	782	1048	125

*¹ Aspect of the groove between blades [Depth/Pitch]

*² Corresponds to Table 4.2-1.

*³ Ratio of solid flame height [Peak/Flame source]

(3) 対向面からの入射熱の影響の実験的評価

加速的な燃え広がりと上方での発炎燃焼の継続が認められた D112P48 について、対向面を不燃の定温壁に置き換えて空間的に半割にした仕様が D112CW である。Fig. 4.2-17, Fig. 4.2-18 に実験結果を示す。羽板を単独で燃焼させた D112 と D112CW を比較すると、間歇火炎高さの最大値は D112 では 530mm であったのに対して D112CW では 640mm となっており、空気の巻き込みが制限されることによって火炎が伸長することが確認された。一方で、D112CW(ピッチ 24mm)と D112P48 を比較すると、火源や火源近傍の木材に由来する可燃性ガスの濃度が同一となるように溝の容積を設定しても、対向面からの入射熱流束の寄与なしには燃焼が収束することも分かる。

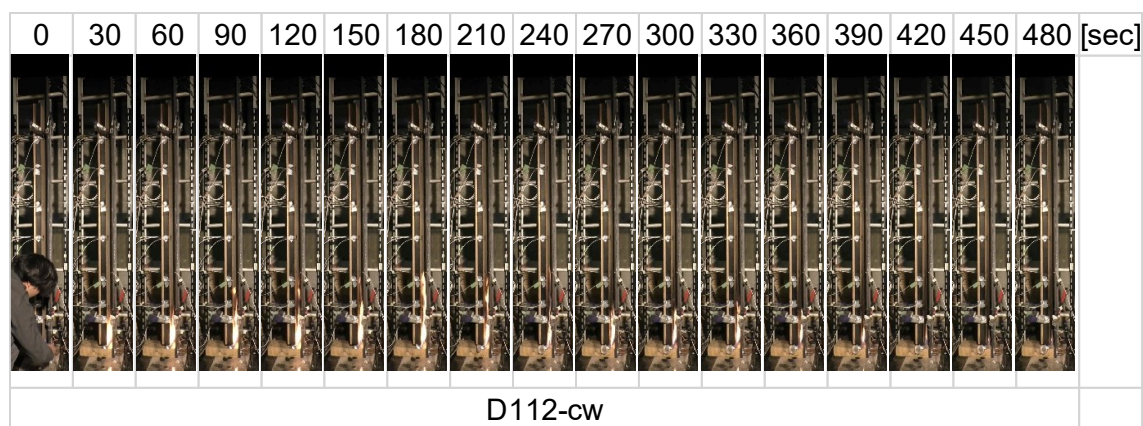


Fig. 4.2-17 Flame spread progress at intervals of 30s (D112CW)

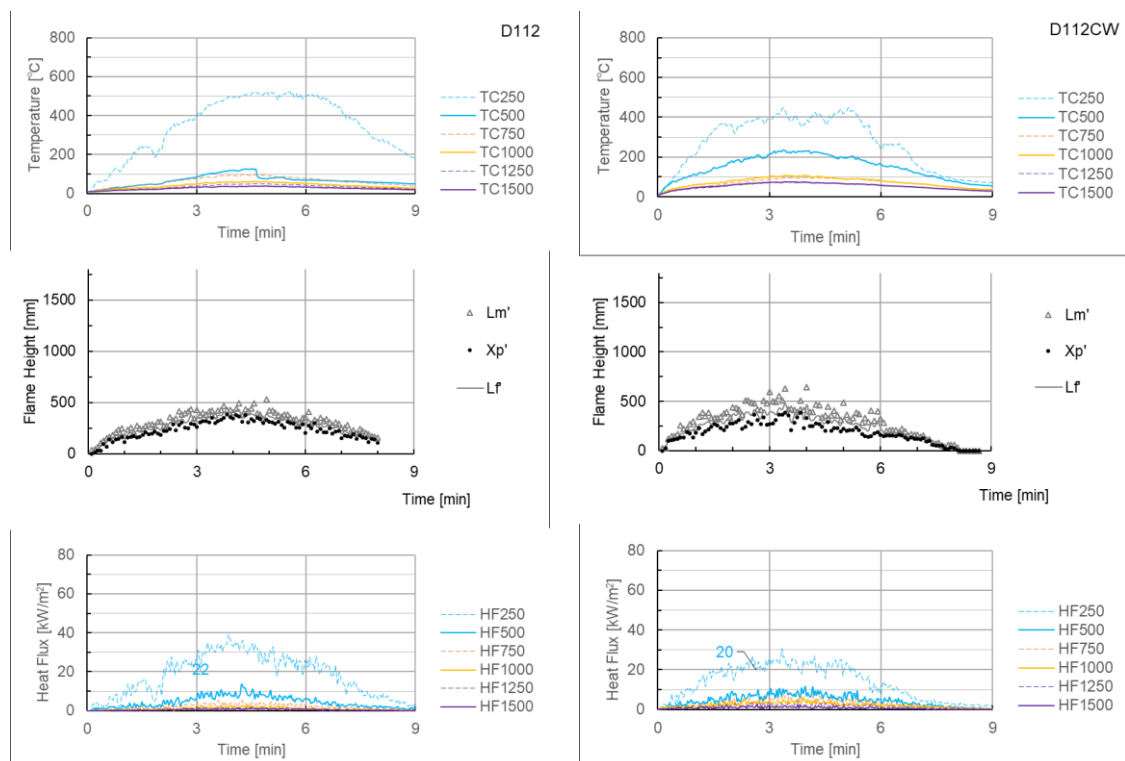


Fig. 4.2-18 Comparison of D112 and D112CW

4.2.5 考察

(1) 平板とルーバーの入射熱分布の差異およびその要因

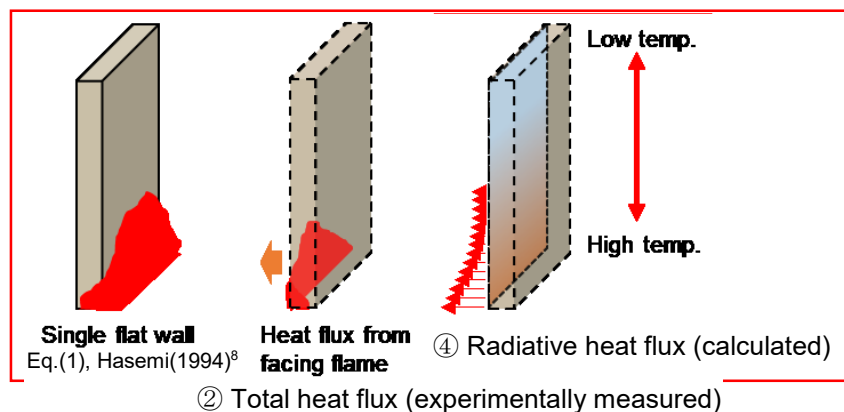


Fig. 4.2-19 Diagram showing relationships between values in Fig. 4.2-21

入射熱流束のデータ数が十分に確保できたものについて、入射熱流束の鉛直方向の分布を L_f (各時点での火炎の伸縮 1 周期分の火炎高さの平均値) に対する無次元高さで表記して Fig. 4.2-20 各仕様の上段に示す。プロット群が Fig. 4.2-19 の②に相当する。対照として文献⁸：外部放射を受けない壁面における入射熱流束の分布を図中の Eq.(1)として示す。本検討では L_f の高さにおいて 20kW/m^2 を上回る入射熱が計測されている仕様が多いが、これは文献⁸での鉛直面における入射熱流束分布と比較して最大で 10kW/m^2 程度、高い値を取っていることになる。このことから、ルーバー架構で燃え止まり高さが上昇する要因に、間歇火炎の到達域における予熱が増加していることが確認されたといえる。

Fig. 4.2-20 下段に示した片対数グラフは、各仕様における鉛直方向の入射熱分布の傾向を、単独壁面と比較するために作成したもので、プロット群が Fig. 4.2-19 の④に相当し、熱流束計を想定した 60°C の点が取得すると推定される放射熱収支の推定値である。実線は各仕様での入射熱の回帰式と平板における入射熱分布⁸の差分を示す。なお、一旦火炎が到達した領域では実験時間の経過とともに羽板温度が上昇し、対向面への入射熱を増加させる要因になると考えられることから、本データは各仕様それぞれに対し、火炎高さの上昇過程のみのデータを抜粋してある。

以上から、 $0.5L_f < x < 3.0L_f$ の高さにおいて、ルーバー形状であることに起因する入射熱の増加は、D112 系列の場合には対向面からの放射による熱取得として推定される値と整合することが分かる。一方で D54 系列では、いずれも実測値の方が高い結果となった。縮小模型を用いた火災実験に関する文献²⁹によれば、縮小率の高い模型では空気の粘性の影響が増加し、開口における空気の流速が低下することが指摘されていることから推測すると、これらの条件では間歇火炎およびブルーム域に煤が多く残存し、ガス放射が増加したことなどが、固体からの放射による推定のみでは十分な精度を得られない要因であると考えられる。

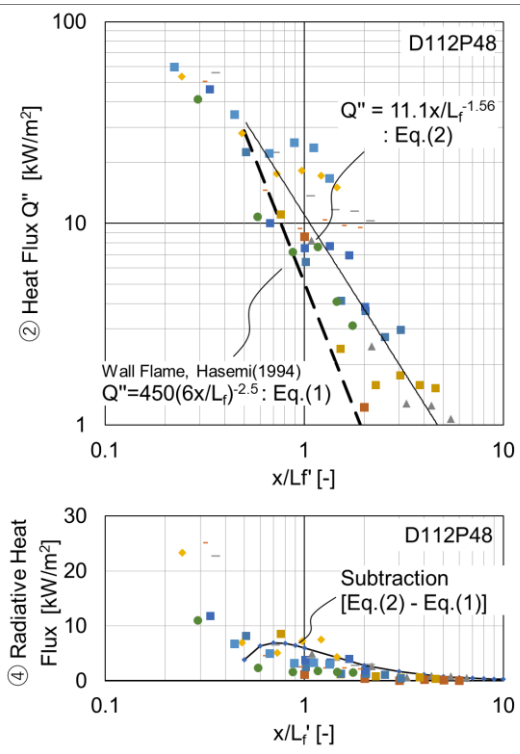


Fig. 4.2-20-a: D112P48

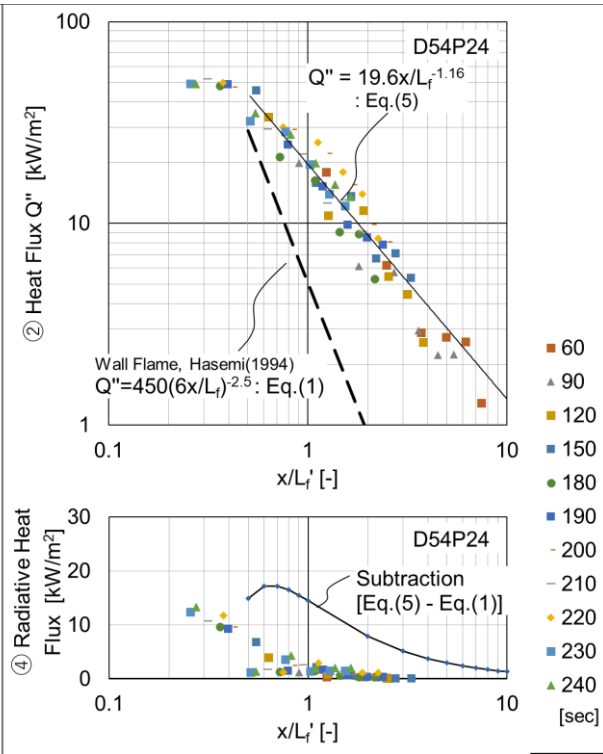


Fig. 4.2-20-b: D54P24

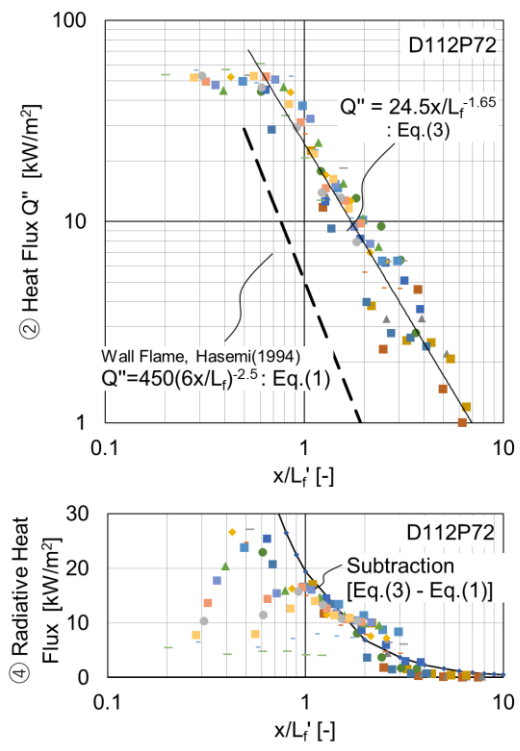


Fig. 4.2-20-c: D112P72

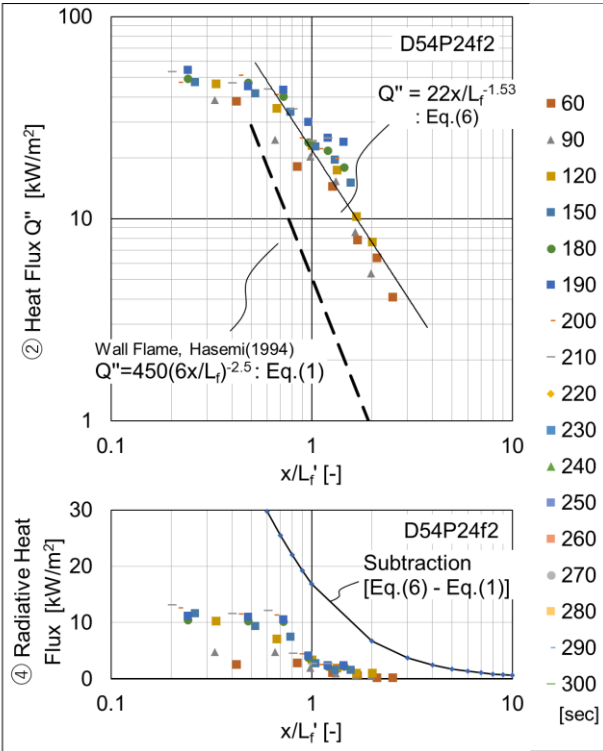


Fig. 4.2-20-d: D54P24f2

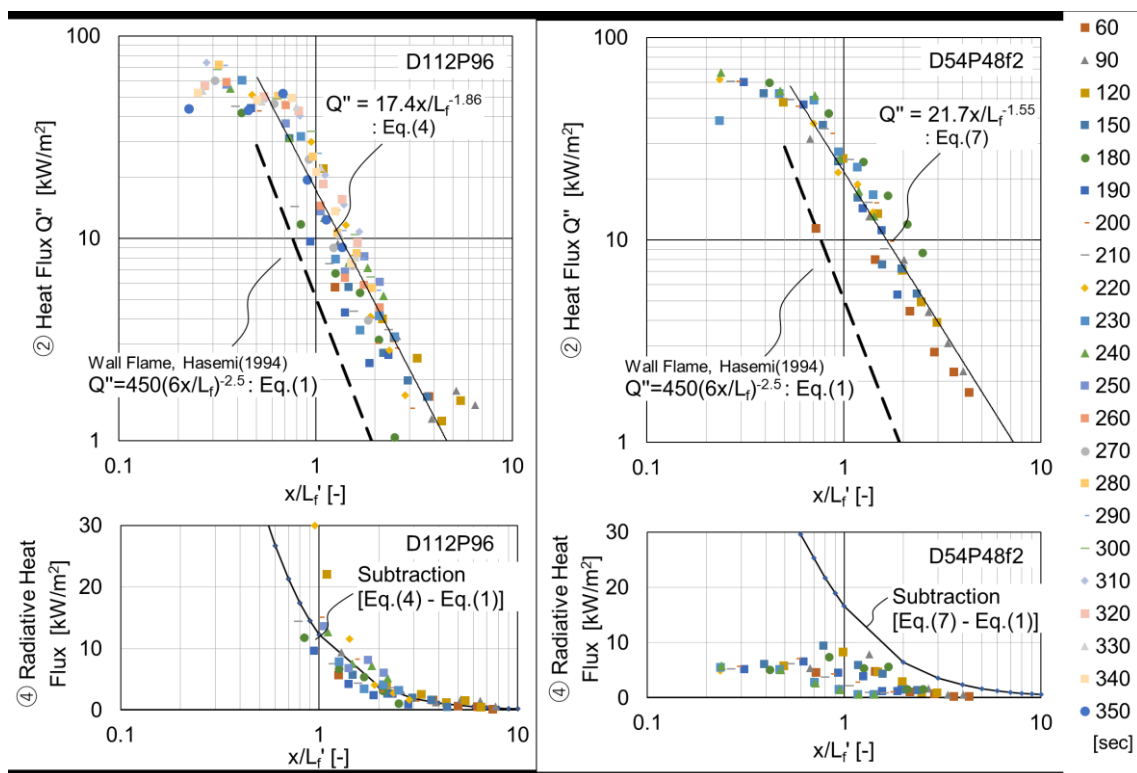


Fig. 4.2-20-e: D112P96

Fig. 4.2-20-f: D54P48f2

Fig. 4.2-20 Vertical heat flux distribution

Horizontal axes show normalized height of each measuring point.

(2) 羽板温度の定式化の可能性

前節にて奥行の大きい D112 系列のルーバーに対して、放射による熱取得の推定が有用であることが明らかになった。そこで、本節では羽板の温度分布の類型化を試みることで、任意の形状に対する温度分布の予測可能性について検討する。Fig. 4.2-21 は、火炎高さの上昇過程において実測された羽板の鉛直方向の温度分布を L_f に対する無次元高さで表記したものである。前節と同様に、検討対象は羽板温度の点数が十分に確保できたものに限定した。D112 系列に注目すると、例えば $x=0.7L_f$ において D112P48 と D112P96 の温度の間に 100°C の差異があり、これを基に算出される放射の値は D112P48 の回帰式を用いて計算すると、D112P96 の回帰式を用いた場合の 1.7 倍となることから、平面形状によらない一般式の導出は困難と考えられるが、本結果を用いた危険側の推定は可能であると考えられる。

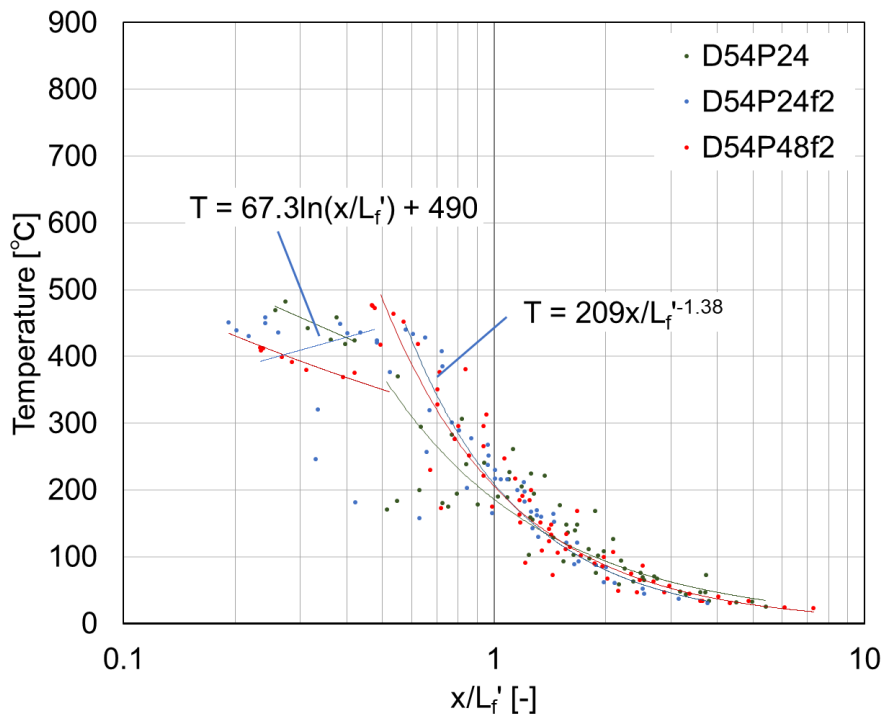
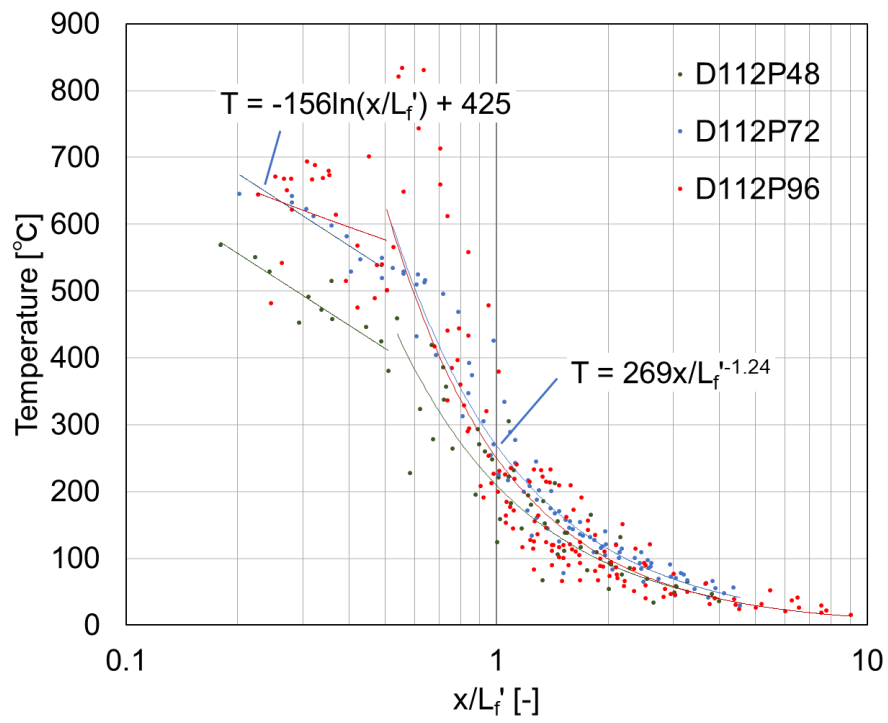


Fig. 4.2-21 Vertical temperature distribution
Horizontal axes show normalized height of each measuring point.

(3) 既燃部の燃焼に対する相互放射の影響

前節(1)より、単独の面が燃焼する場合と比較して燃え止まり高さが増加する場合、概ね $0.5L_f < x$ の領域において全入射熱が増加していることが確認された。一方で、これらの中でも、火炎が到達してからの燃焼の継続性は仕様によって異なり、特に小型のルーバーでは上方での燃焼が維持されにくい。Fig. 4.2-22 に、上方での燃焼継続の有無が異なる 3 仕様の結果を例示する。D54P24 は火源の消炎時刻である 6 分 30 秒よりも前にピークを迎え、直ちに X_p 高さが減衰したもの、D112P48 はピークを迎えた後、火源の消炎後まで上方で燃焼を維持し、かつ下方の燃え尽きが先行して生じたものの例である。

Fig. 4.2-20b に例示したように、D54P24 等の平面的に小さいルーバーにおける間歇火炎域の入射熱流束は D112P48 と同等か、それよりも高い値を示していることから、火炎到達後の燃焼の継続性には他の要因が考えられる。そこで、本節では既燃部の燃焼に注目して考察を行う。

Fig. 4.2-22 の最下段に示した対向面からの入射熱流束の推定値をみると、D54P24 をはじめとする奥行の小さいルーバーについては、温度上昇が緩慢であることに起因して、 20kW/m^2 を超える部分が存在せず、これらのルーバーの燃焼は火炎からの熱取得に依存していたと推定される。木材などの燃焼時に炭化を伴う材料は着火直後に発熱ピークを迎えることから、火源の消炎前に火炎高さのピークを迎えた後は速やかに X_p が減衰したと考えられる。

以上(1)～(3)より、ルーバー形状における入射熱分布への影響要因について、奥行約 110mm のルーバーにて生じる入射熱流束の増加は対向面との放射熱収支を評価することによって、概ね評価可能であること、また、安全側の結果を与える温度分布の回帰式を導出した。また、既燃部の燃焼継続の有無も同様に、対向面との放射熱収支が支配的であると考えられることが分かった。一方で、奥行の小さいルーバーにおける入射熱の増加については、上記の観点から考察することが困難であった。

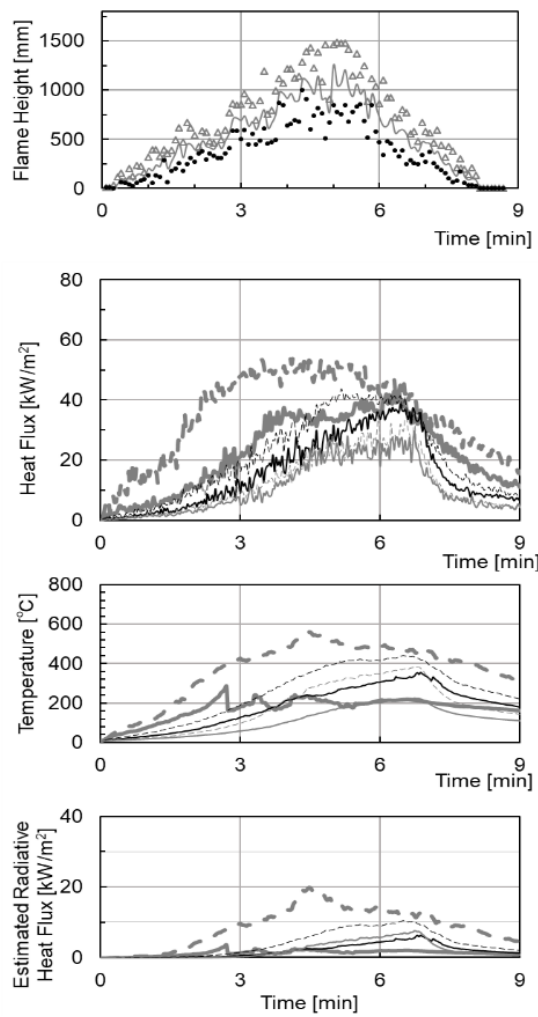


Fig. 4.2-22-a (D54P24)

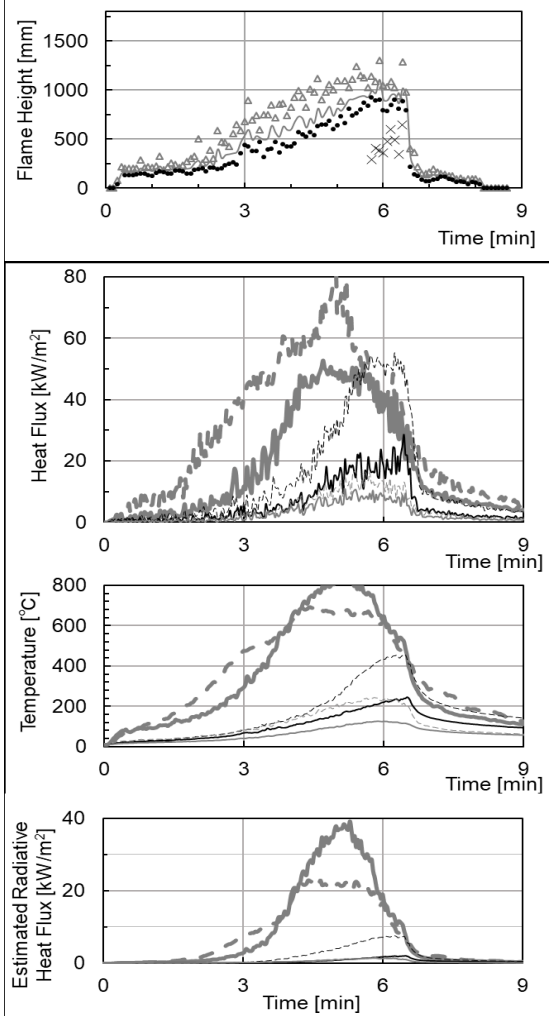


Fig. 4.2-22-b (D112P96)

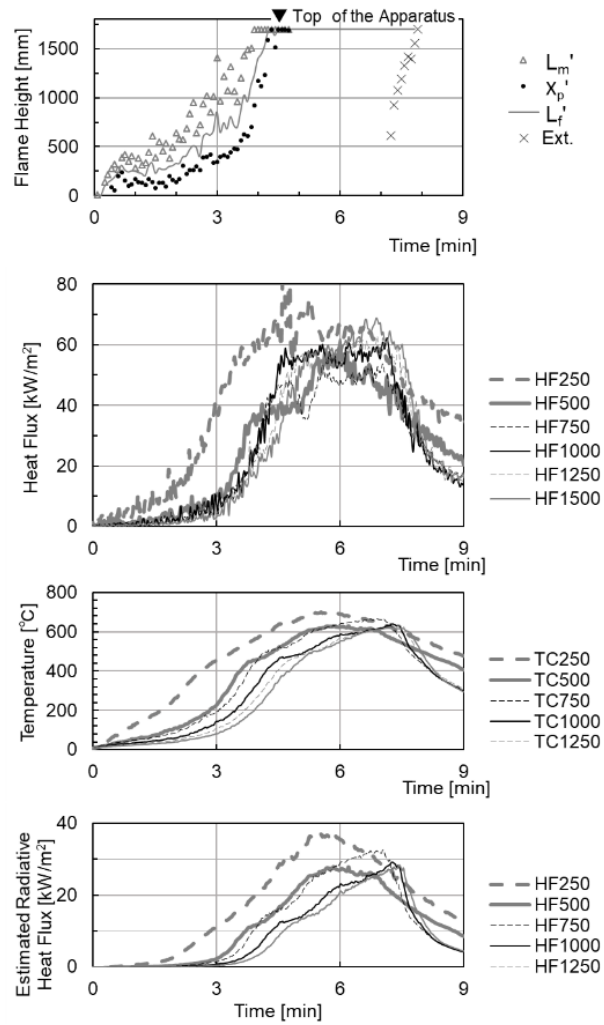


Fig. 4.2-22-c (D112P48)

Fig. 4.2-22 Examples of burning patterns in reduced-scale experiments
Ext.: Lower limit of the area flame is extinct.

4.3 実大・幅方向縮小実験（実験Ⅱ・Ⅲ）

4.3.1 実験方法

(1) 装置の構成

実験装置の概要を Fig. 4.3-1, Fig. 4.3-2 に示す。本実験は、外部からの予熱を受けない条件下で、ルーバー等の壁面架構の燃焼性を実大で評価することを目的としている。そこで、実際のルーバー壁面を部分的に再現した試験体を、実火災と同様に奥行きのある平置きバーナーを火源とした条件のもとで加熱し、火炎高さおよび発熱性状を実測した。装置は、試験体を組み付けたパネル、側方への熱の散逸および空気の巻き込みを制限する側壁、それらを保持する自立架台から成る。側壁の寸法は、4.3.3 で後述する予備実験を踏まえ、375mm（火源奥行き $\frac{3}{4}$ ）とした。実験は集煙フード（5×5m、風量 180m³/min）下で行い、試験体下方に設置した 500mm 角の拡散バーナーで定常加熱を与えた。フードにより収集された燃焼ガスから酸素消費法により発熱速度[kW]を算出した。

実験は東京理科大学火災科学研究センター 火災実験棟の 5m 角フード下で実施した。実験スケジュールを短縮するために、W500×H1,700 mm のサイズでユニット化した試験体を現地で組み上げるような実験方法にすることで入れ替え時間の短縮を図った。架台はこの要求に沿うように、自立架台と引掛金具付きの側壁から成る。各部の詳細は資料編(3)に掲載する。

(2) 実験条件

火源の発熱速度は、単位幅あたりの発熱速度が椅子（クッション付き）やソファ（木製フレームにクッションを置いた構成）³⁰のピーク値と概ね等しくなるよう、目標発熱速度 200kW の定常火源とし、加熱時間は 20 分とした。火源は Fig. 4.3-1 の通り 500mm 角の拡散バーナーを水平に設置した。燃料は都市ガス（流量 260L/min、主成分メタン：単位発熱量 45MJ/m³）とした。バーナーの出力は、ガス流量をマスフローコントローラーにより上記の出力に合わせることで制御した。また、点火はバーナーの噴出面に置いた固形燃料を口火として、実験開始と同時にガスを供給することで行った。火源単体で実測した発熱速度の推移を Fig. 4.3-2 に示す。発熱速度の平均値は 183.3kW であった。

(3) 計測項目

実験は集煙フード（5×5m、風量 180m³/min）下で行い、燃焼ガスから酸素消費法により発熱速度[kW]を算出した。

Fig. 4.3-4 に熱電対および熱流束計の配置を示す。熱電対は壁面もしくは羽板中央の温度分布を計測するように、火源面から 1500mm まで 250mm ピッチ、3000mm までを 500mm ピッチで合計 9 点配置した。熱流束は、羽板への熱流束計の設置が困難であったことから

後壁への入射熱を計測した。割り付けは 500mm 間隔とし、計 6 点を配置した。

火炎高さの測定方法は、4.2.3(2)で示した要素実験に対する測定方法に準じた。Fig. 4.3-8, Fig. 4.3-9 に例示する通り、燃烧拡大の途中過程(実験開始 45 秒～48 秒)における II・F、II・P48 の火炎の伸縮の周期は、ともに約 0.8 秒であったので、書き出す際のフレーム間のインターバルを 0.2 秒、計測インターバルを 4.2 秒とした。

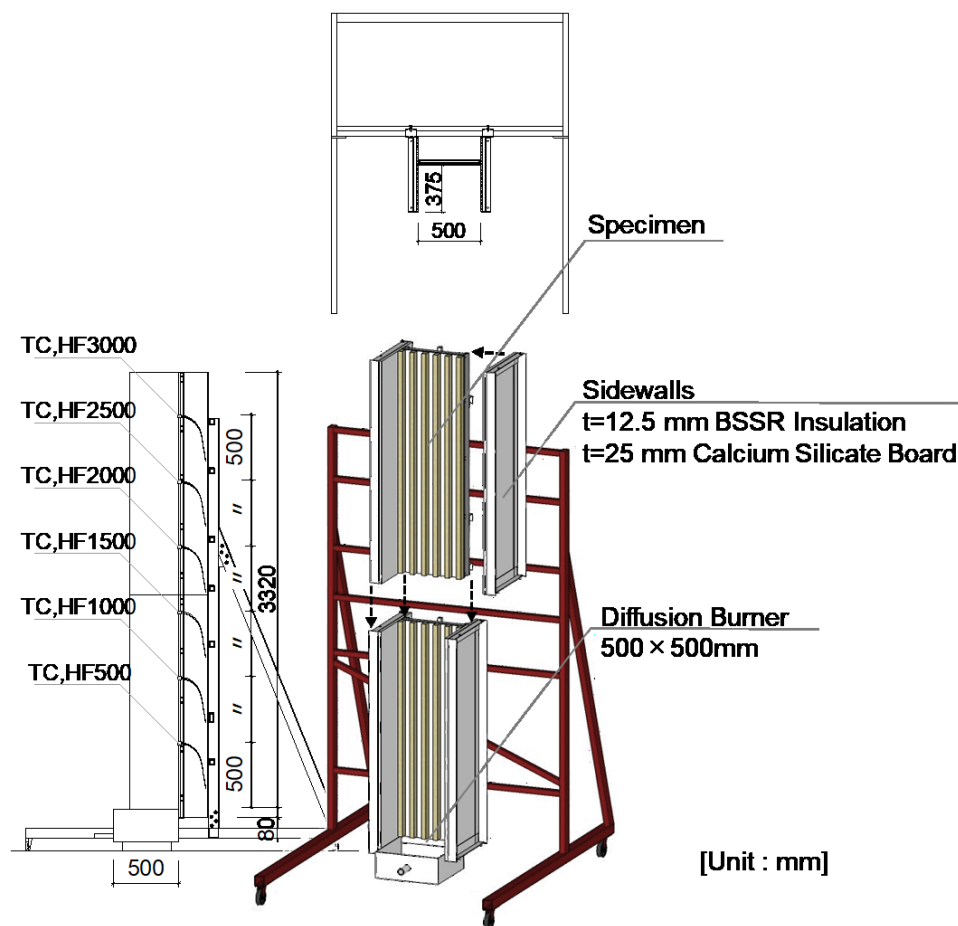


Fig. 4.3-1 Apparatus for full-scale experiments



Fig. 4.3-2 Assembly of main frame

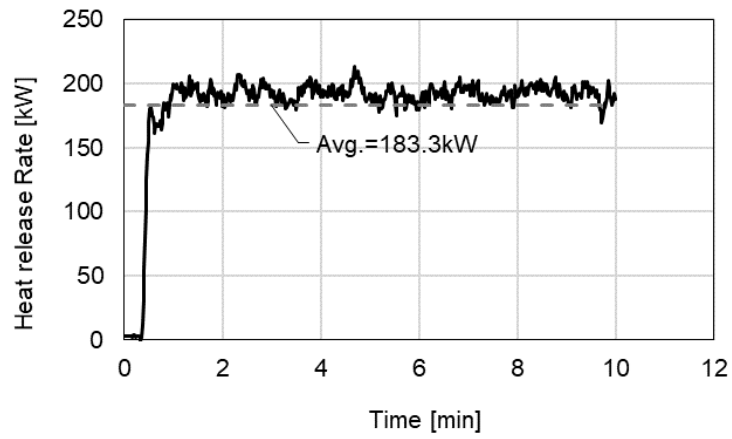


Fig. 4.3-3 Heat release rate of the flame source

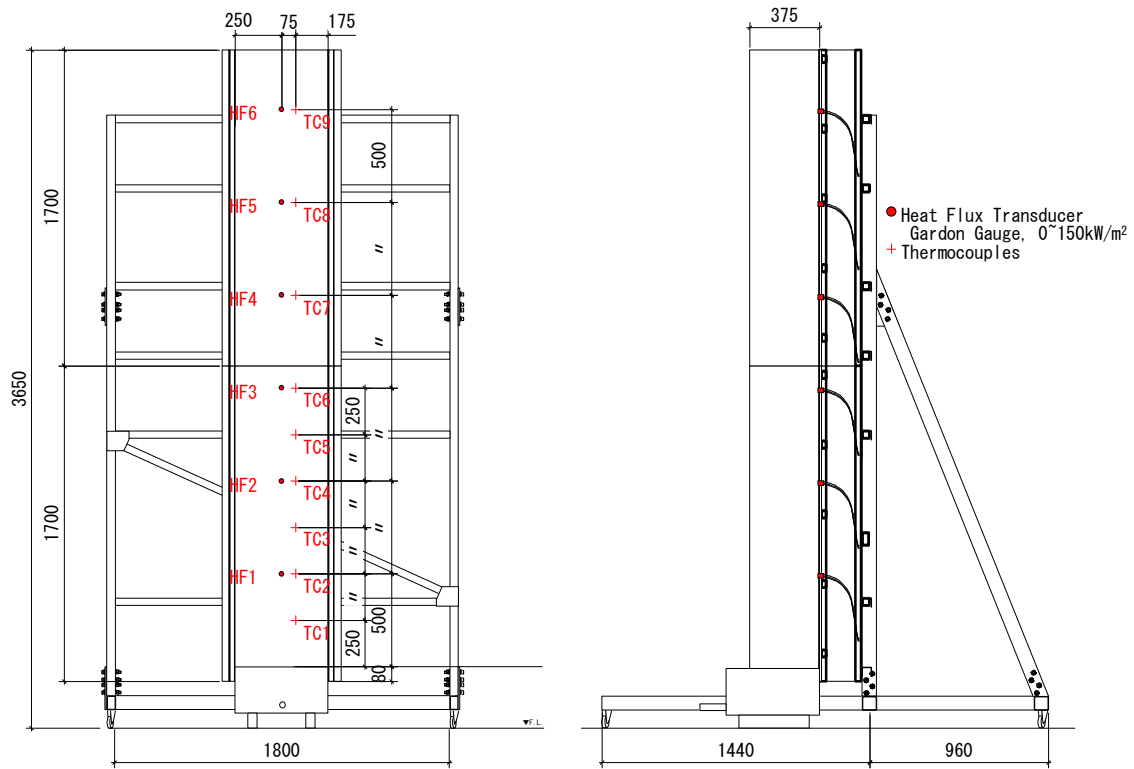


Fig. 4.3-4 Typical setup

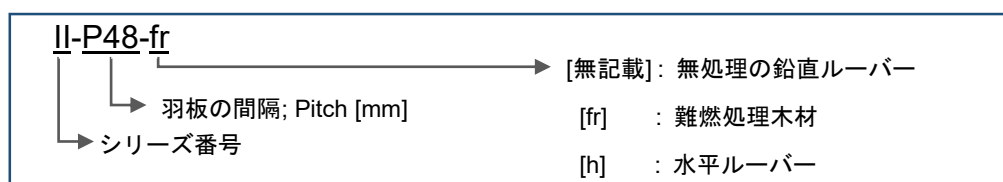
4.3.2 試験体

(1) 不燃材の壁面（実験条件の検討用）

本装置は試験体幅より広い壁面が燃焼した時との差異が生じないようにしつつ、比較的簡易な実施を可能にするため、側方からの空気の巻き込みや、火炎の拡散を抑制する目的で側壁を設けてある。一方で、Tsai らの文献³¹においては、側壁のない試験体で火炎伝播の評価を行うと、火炎が面中央で高い A 字状の分布になること、それに伴い、幅広の試験体になるほど火炎伝播速度が増加すること、反対に、側壁が存在する場合には、そのコアンダ効果によって火炎の分布が側壁に向かって高くなる分布となり、火炎伝播が全体として遅延することを示している。本検討では予め、火炎の水平方向の分布が著しく不均一とならないような側壁の出寸法を、事前に不燃材の壁面（ケイ酸カルシウム板に 25mm セラミックブランケットを貼ったもの）を用いて検証した。

(2) シリーズ II：実大ルーバーおよび平板

Fig. 4.3-5 に試験体の例を示し、Fig. 4.3-6, Fig. 4.3-7 に試験体の一覧を示す。試験体名は以下の要領で記載する。



前節の小型実験（シリーズ I）の結果から、燃焼性状が大きく変化するルーバーのアスペクトは概ね D/P（深さ/ピッチ）0.6～1.2 の間に存在することが示唆された。そこで、本検討でもこれとほぼ同一のアスペクトを持つ 2 仕様を実大で検証した。それぞれ II・P90（D/P=0.64）、II・P48（D/P=1.2）が対応する。羽板厚さは、前節と非加熱面までの距離を等しくするために、18mm の 2 倍を目安として 35mm とした。試験体の両端は、側壁を対称面とするように、厚 18mm の羽板を側壁に密着させて配置した。このほかに、上記よりも羽板の間隔が広いルーバー II・P215（D/P=0.27）、平板 II・F、II・P48 と同じ密度で水平に羽板を配置した II・P48-h も検討した。前節との比較検討を行えるよう、これらの材質は全て無処理スギとし、背面は 12mm のケイ酸カルシウム板で裏打ちした。

また、仕様 II・F および II・P48 は、材料を難燃処理スギとした仕様も製作した。難燃処理は 3 章と同一のポリリン酸カルバメートの主成分とする薬剤（丸菱油化製ノンネン W2-50）で、目標薬剤量は 2 章の発熱性試験の結果に基づいて 40 kg/m^3 （実測値 $50 \pm 15 \text{ kg/m}^3$ ）とした。この水準は、建築基準法上の難燃性能の製品の目標値よりも低い、3 章の結果から発炎燃焼が抑制できる薬剤量として設定している。材長方向に薬剤を均一に分布させるため、インサイジング（1600 孔/ m^2 ）を施して注入を行った。また、3 章で確認した通り、材料表面の薬剤量が多いと燃え広がりを抑制する上では安全側となるため、表層と平均の薬剤

量が乖離しないように、注入時の挽板厚さを仕上げ寸法より十分厚い 25mm とした。

難燃処理平板のⅡ・F・fr では両側 3.5mm ずつ切削して厚さ 18mm に調整し、両木端に 9×9mm の溝を切って相決りで留め付けた。難燃処理ルーバーのⅡ・P48・fr では、ルーバーの溝に面する部位に薬剤量の最も少ない挽板内部を露出させる目的で、厚 19.5mm に仕上げた板 3 枚をレゾルシノール接着剤で集成した後、幅方向に切断して使用した。これら工程の詳細は資料編(4)に掲載する。

(3) シリーズⅢ：底の防火的効果の検証

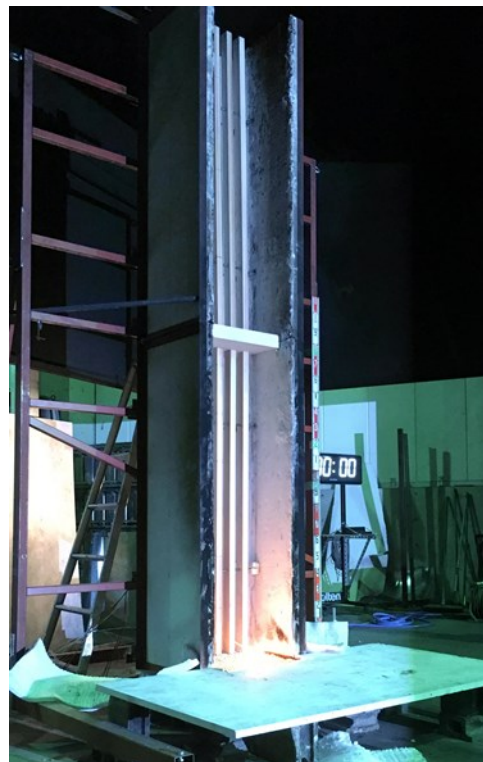
シリーズⅡのうち、もっとも羽板間隔の狭いⅡ・P48 の燃焼を局所化する方策として、中途に底を設けた仕様を設定した(Ⅲ-a)。製作工程の詳細は資料編(5)、詳細な図面は資料編(6)に掲載する。

また、こうした防火措置をとる上でルーバーが特異なのは、ルーバーが密な壁面ではなく、開口を有する点である。背壁をもたないルーバーの場合、前後での通気が生じ易くなりコアシールド効果が低減されるから、底によって一旦面外から隔離された火炎が壁面方向に戻りにくくなる可能性を考えた。そこで、Ⅲ-b, c は背壁から距離を取ってルーバーを配置した仕様とし、上記の効果を検証した。この 2 仕様については、端部の羽板 2 本を減らすことでⅢ-b, c と他仕様の表面積を揃えている。

全仕様において、側壁とルーバー羽板の位置関係(側壁の出寸法は全仕様においてルーバー先端から 317mm)、羽板先端からの底の出寸法(200mm)、底先端から側壁先端までの距離(117mm)は揃えてある。また、背壁なしの仕様の羽板の支持方法については後壁から支持用の M6 寸切ボルトを持ち出して下穴を開けた羽板をはめ込み、鉄パイプφ15mm を切断して作ったスリーブで両側から挟み込んだ。ボルトが熱橋とならないよう、パイプとの間にはセラミックウールを充填した。

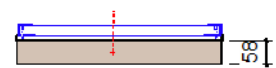
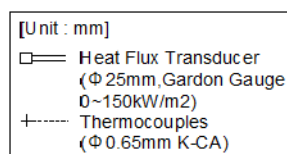


a: II-P48

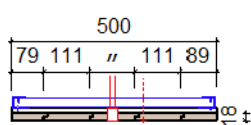


b: III-c

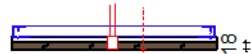
Fig. 4.3-5 Assembled specimens



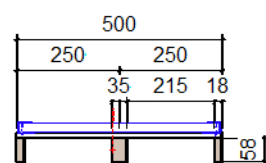
II-P48-h



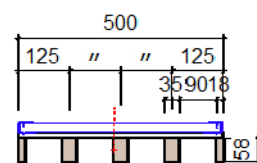
II-F



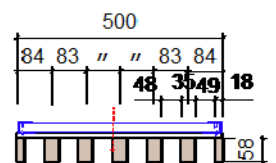
II-F-fr



II-P215



II-P90



II-P48



II-P48-fr

Fig. 4.3-6 Plans of series II

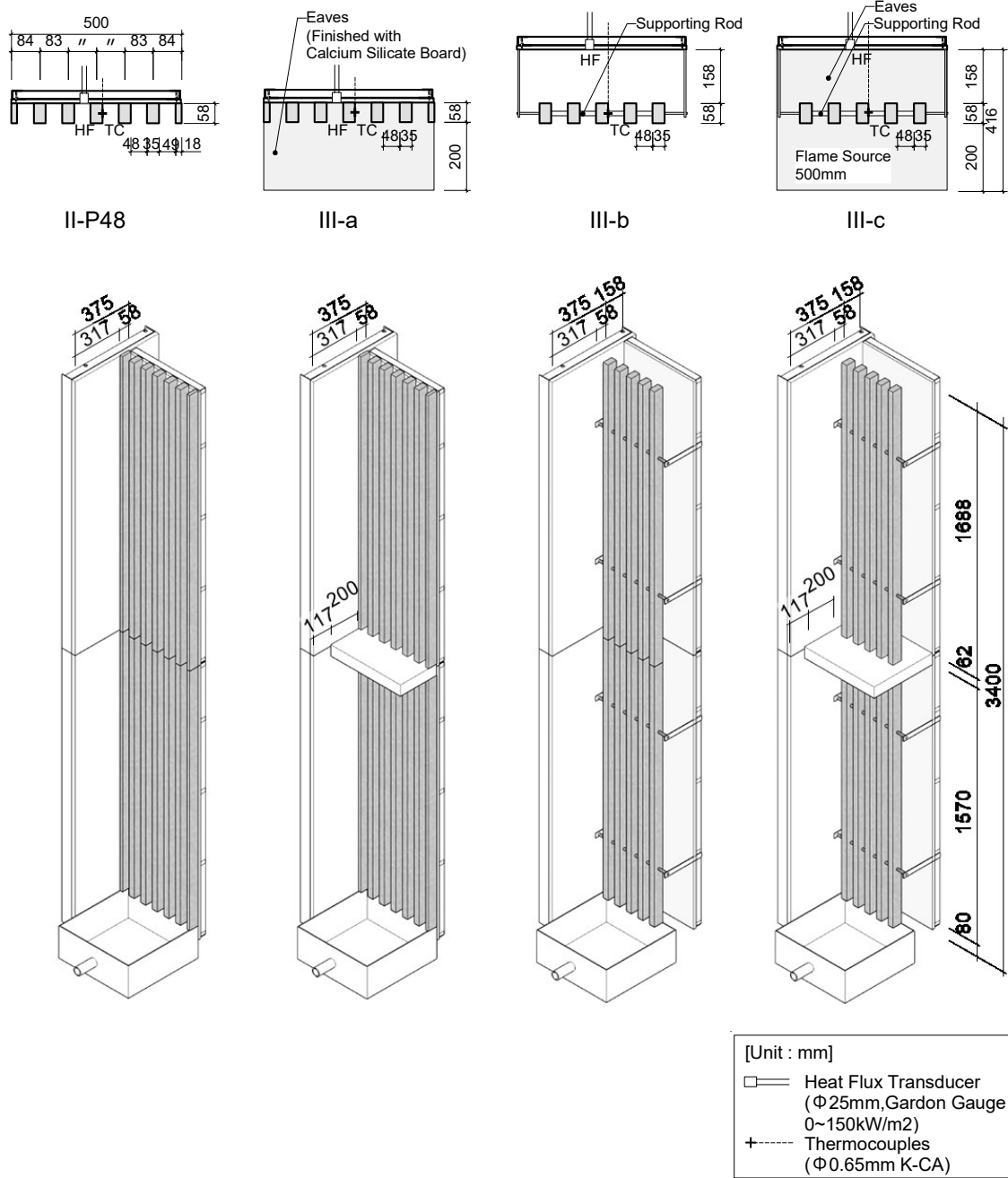


Fig. 4.3-7 The plans and isometric drawings of series III (variations of II-P48)

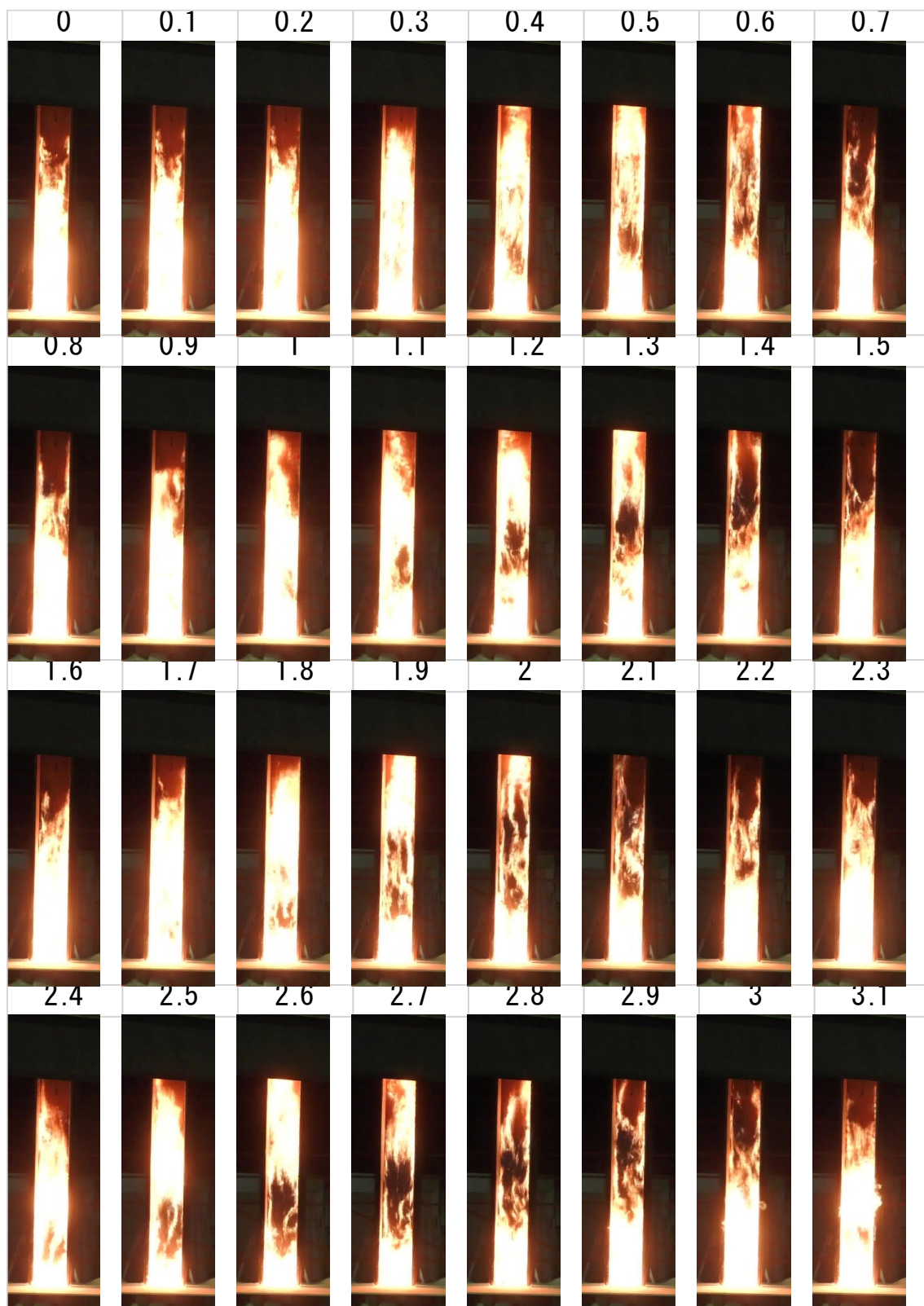


Fig. 4.3-8 Flame images at intervals of 0.1 seconds (II-F)

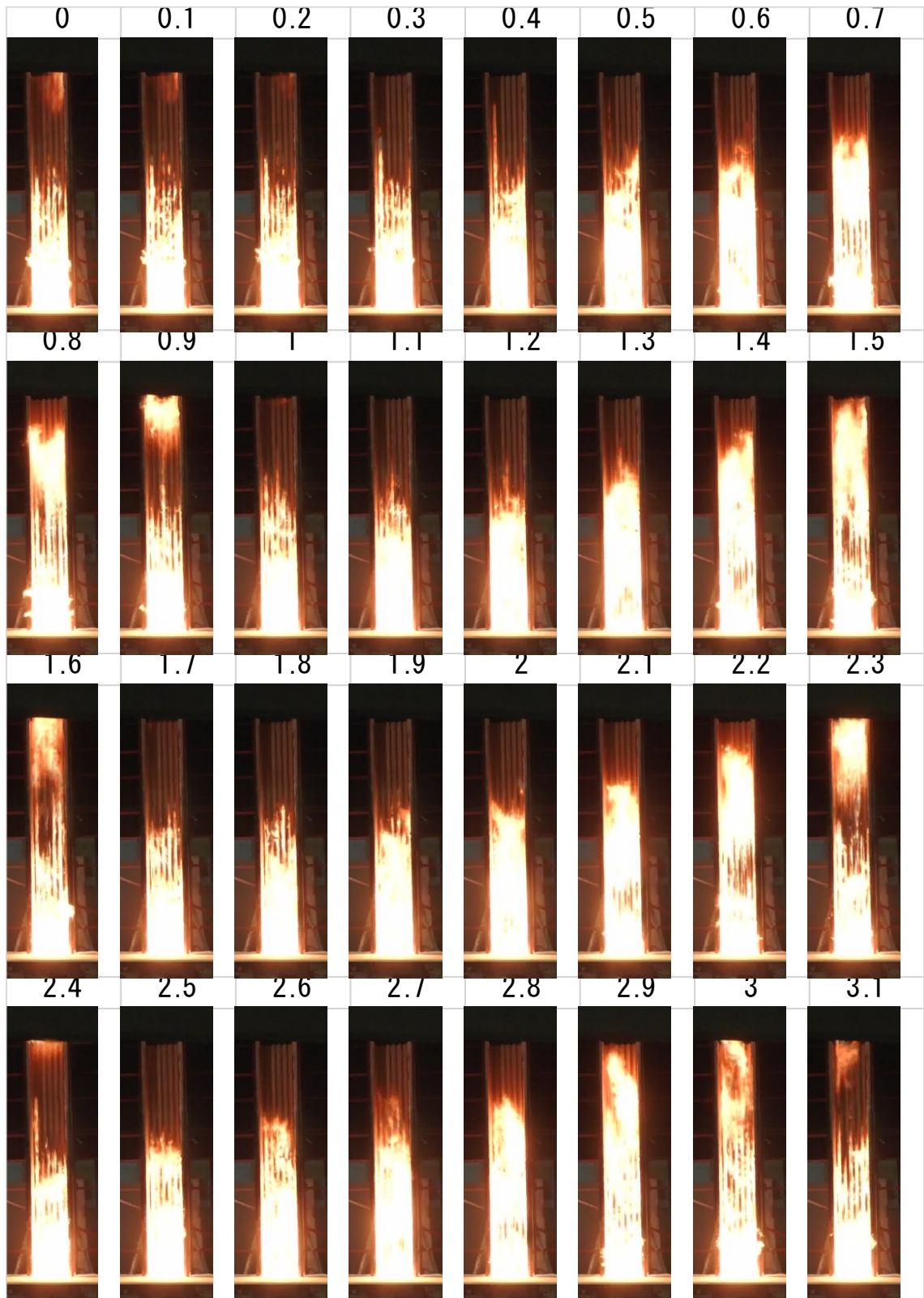


Fig. 4.3-9 Flame images at intervals of 0.1 seconds (II-P48)

4.3.3 加熱条件の検討

4.3.2(1)に示した試験体を用いて側壁の出寸法を検討した。不燃の壁面の場合、加熱開始以降ある程度時間が経過すると温度、熱流束とも一定値に収束するので、Fig. 4.3-10 に示すように火源発熱速度を段階的に増やしながら、1条件あたり7分の計測を行った。発熱速度は50、100、200、400kWの4段階、側壁の羽板の奥行きは0、125、250、375、500mm（火源奥行き1/4刻み）の5段階とした。熱流束計は水平方向中央に配置し、H=1500mmまでを250mmピッチ、H=3000mmまでを500mmピッチで計測した。温度は中央と、側壁から90mmの2か所で計測している。中央列をCenter、側壁側をSide系列として示す。

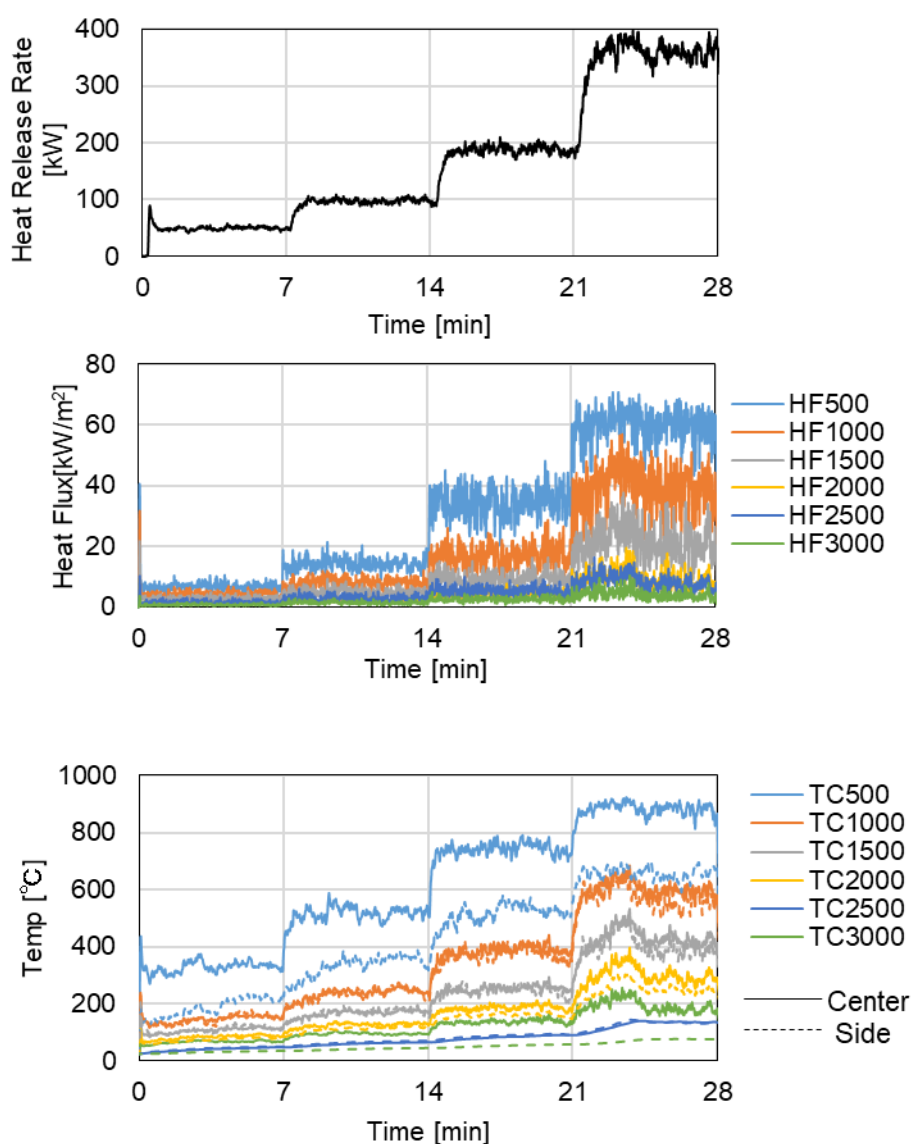


Fig. 4.3-10 Example of blank experiments (sidewall : 0mm)

Fig. 4.3-11～Fig. 4.3-14 に、計測開始から 180～220 秒における 5 秒間隔のインターバル画像を示す。また Fig. 4.3-15 に各条件で、温度と熱流束が概ね定常に達した 3～7 分での温度、熱流束の時間平均を示す。

まず、発熱速度 50, 100kW を見ていくと、側壁 0mm(D=0)と 125mm(D=125mm)で既に火炎の分布性状は大きく異なることが分かる。側壁なしでは中央に火炎が寄っているのに対して、側壁ありの場合はいずれも側壁の方で火炎が高くなっている。火炎高さに注目すると、50kW では 0mm、500mm とともに差異が顕著でないが、100kW では 375mm 付近から火炎が高くなっていることが認められる。火源発熱速度 50kW 時の火炎高さに側壁の出寸法がそれほど影響しないのは、そもそも巻き込み空気量が少ないためと考えられる。

発熱速度 200kW では、側壁 125mm 程度まで側方への火炎の漏出が多く、側壁付近で火炎が高く、側壁 250mm 程度の方が火炎は均一に分布している。また、側壁の出寸法を増やしても顕著な差異は認められない。

火源発熱速度 400kW のとき、側壁なしと側壁の出寸法 125mm では火炎の形状や高さにそれほど差異がない。発熱速度 400kW と側壁の出寸法 125mm、250mm の組み合わせでは、火源面近傍は厚い火炎が形成されているが、間歇火炎の存在域では側壁に沿って薄い火炎が形成されている。この結果として、間歇火炎域では側壁側の温度が高くなった(Fig. 4.3-15 c, e)。同様に温度分布を見ていくと、水平方向の温度勾配が小さくなるのは、寧ろ側壁の出寸法が大きい時であることが分かり、側壁の出寸法 250mm、375mm では水平方向の温度勾配が殆ど無い。このようになるのは、側壁の出寸法を増やすと、側壁側のコアンダ効果が増加する一方で、間歇火炎となる余剰の未燃ガス量も増加し、面内で一様に火炎の伸縮が起きるようになるためであると考えられる。

実際に可燃物を燃焼させると、火炎の薄い領域が大半を占めると考えられる。発熱速度が低域の場合、火炎の形状は側壁の存在有無によるところが大きく、側壁の出寸法の影響はそれほど顕著でないことが確認された。そこで、以降の実験では側壁の出寸法を 375mm に統一させた。

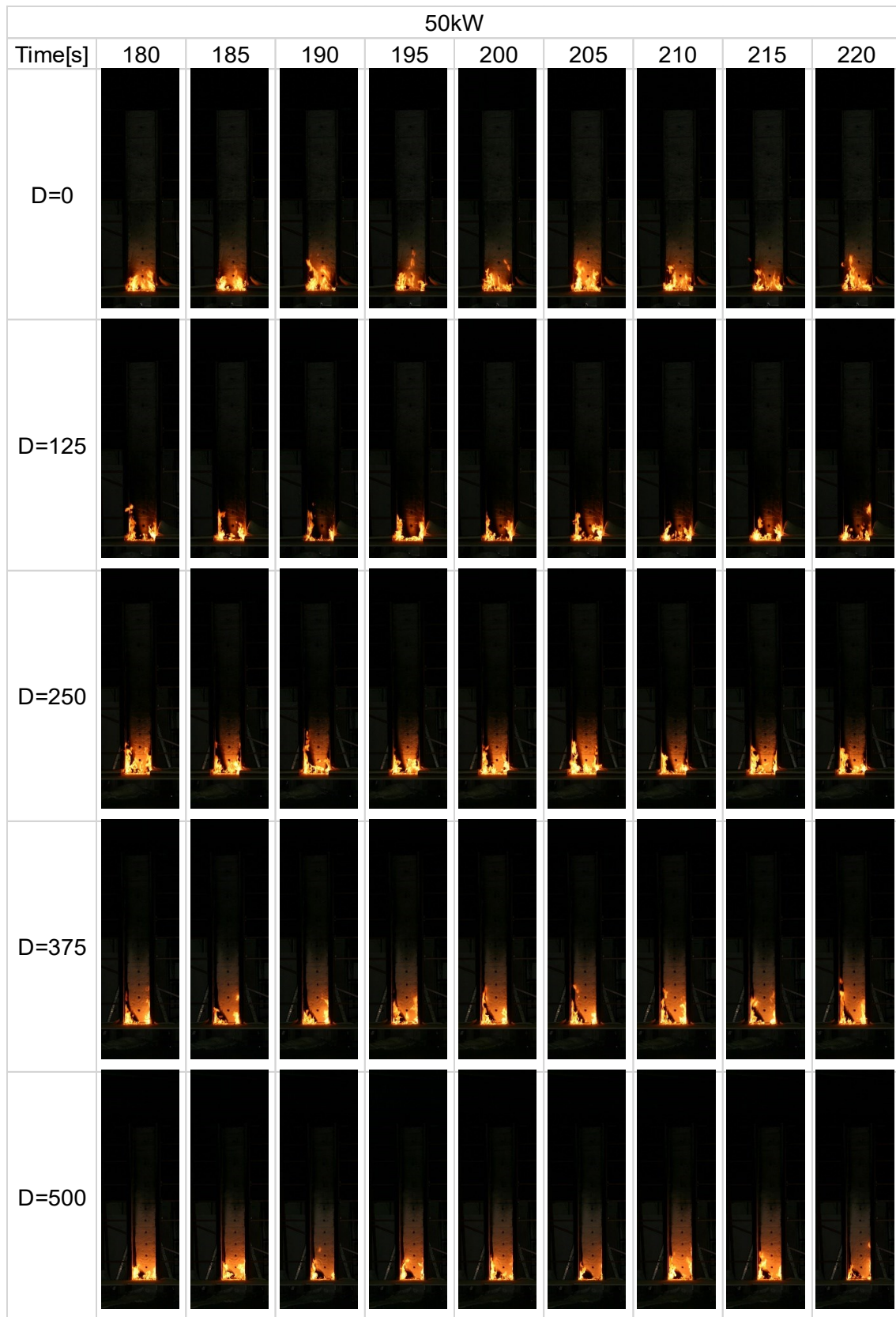


Fig. 4.3-11 Flame images at intervals of 5 seconds (source HRR: 50kW)

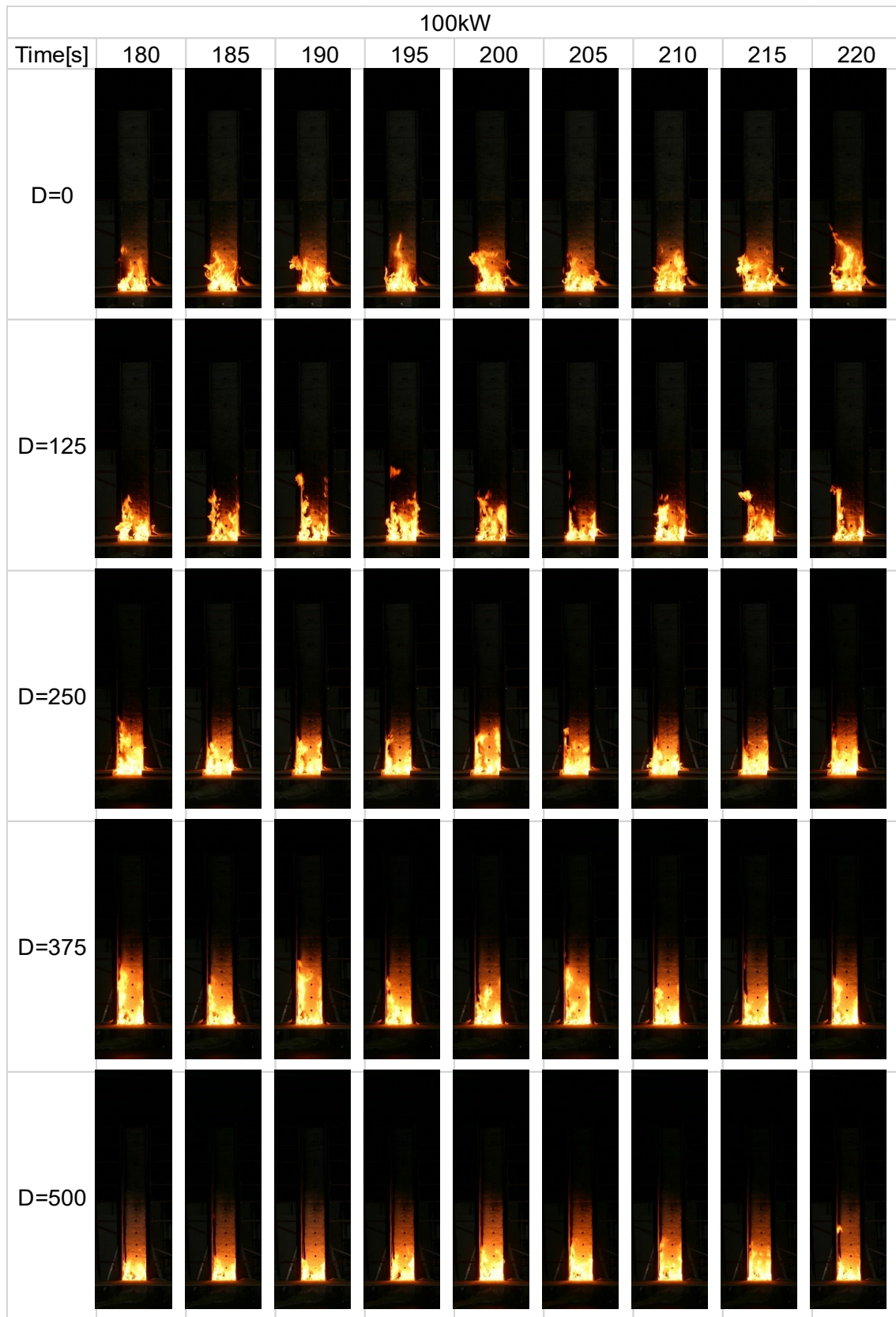


Fig. 4.3-12 Flame images at intervals of 5 seconds (source HRR: 100kW)

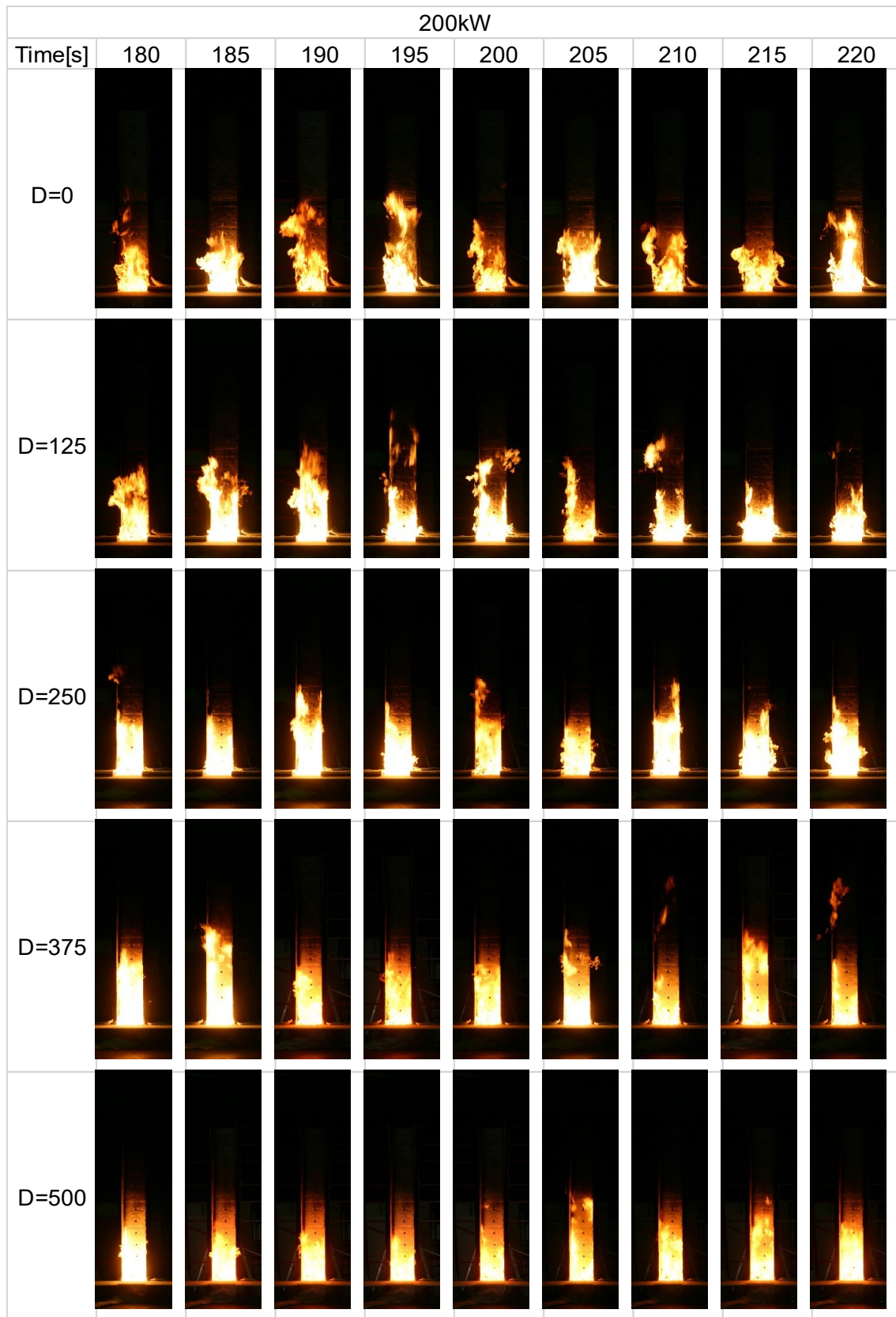


Fig. 4.3-13 Flame images at intervals of 5 seconds (source HRR: 200kW)

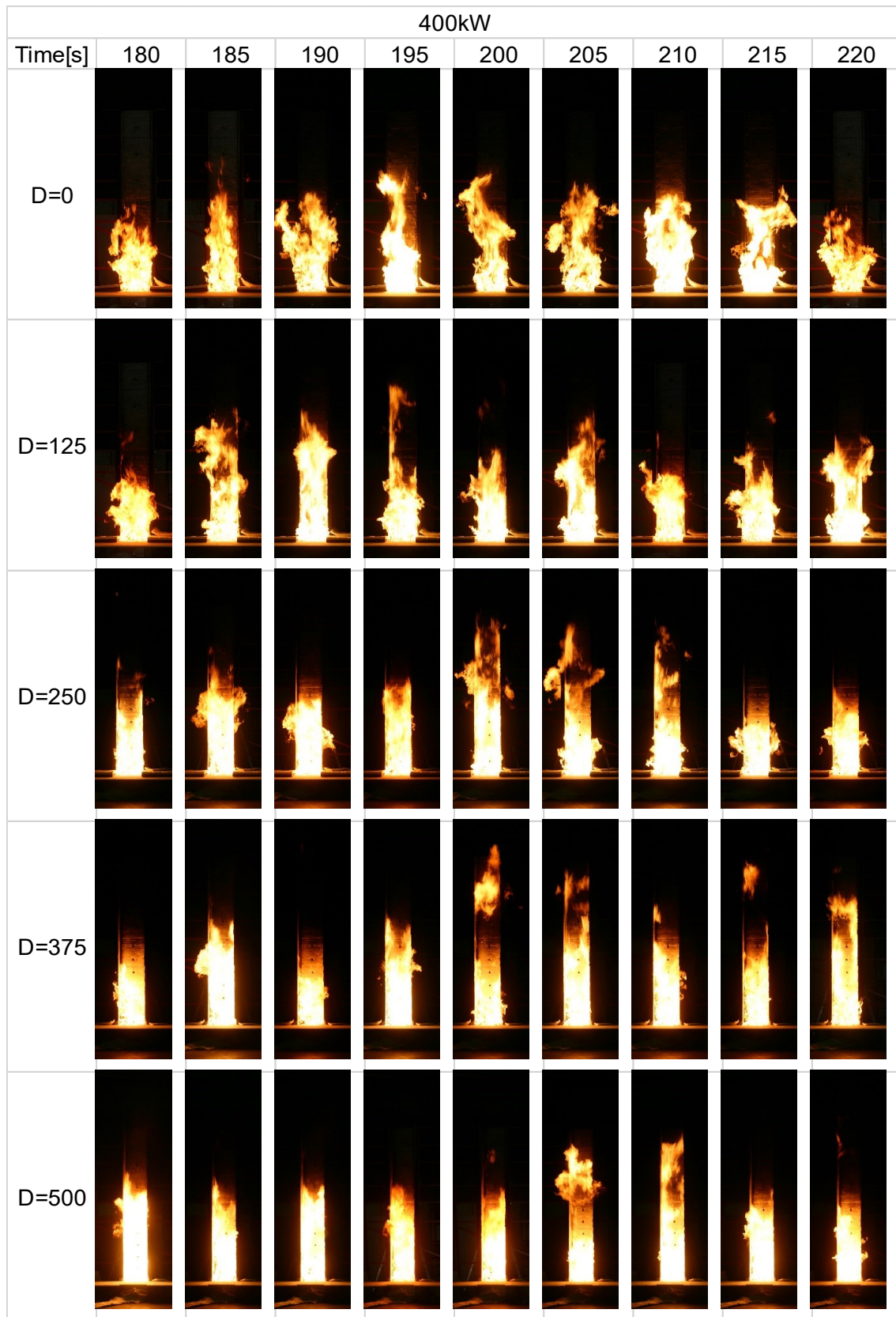
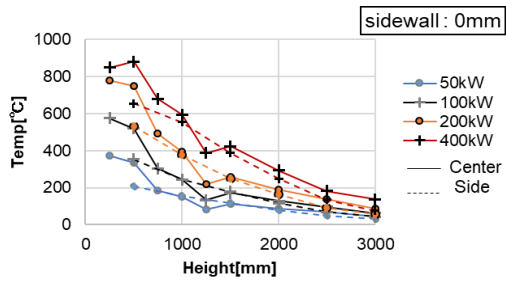
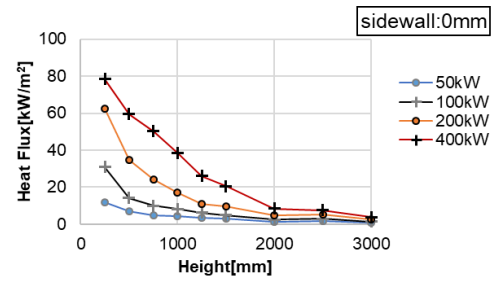


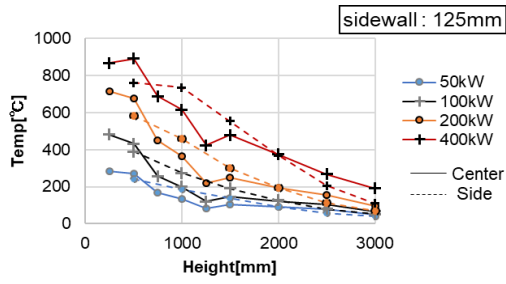
Fig. 4.3-14 Flame images at intervals of 5 seconds (source HRR: 400kW)



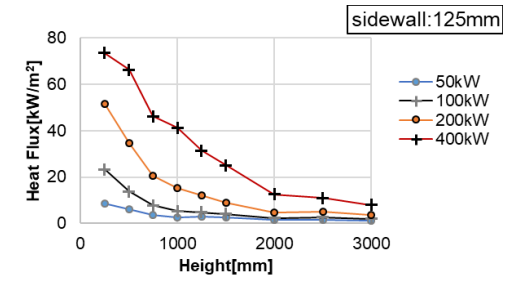
a



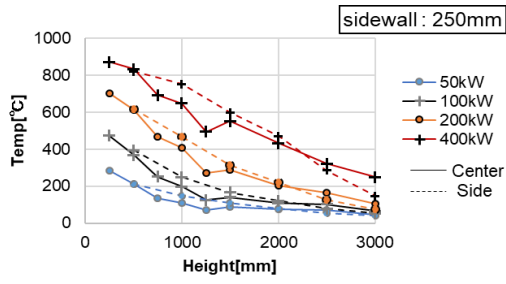
b



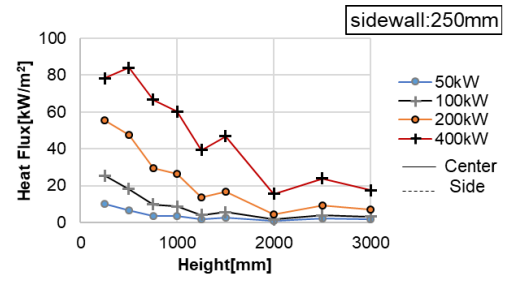
c



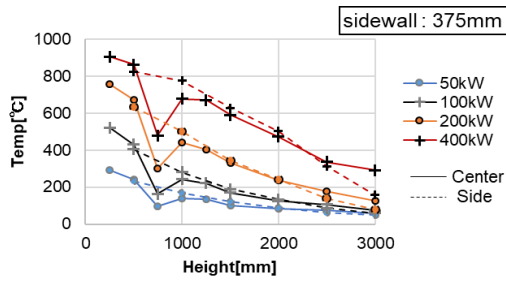
d



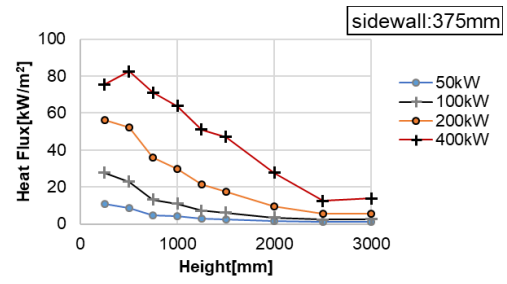
e



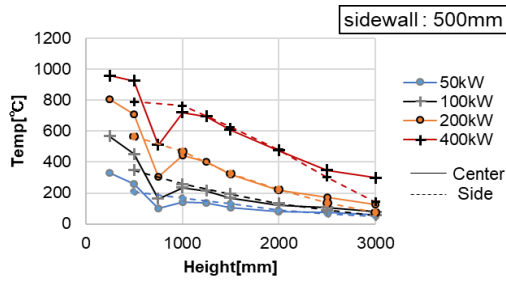
f



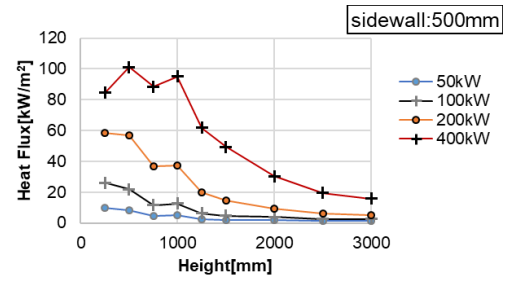
g



h



i



j

Fig. 4.3-15 Vertical distribution of temperature and heat flux

4.3.4 実験結果と考察

(1) 平板および実大ルーバーの燃焼性状

Fig. 4.3-16 の上 2 段のグラフに実大実験における開始 3 分までの火炎高さの推移を示し、Fig. 4.3-17 に実験開始 165 秒までのインターバル画像として示す。水平ルーバーのⅡ・P48-h については他の仕様と比較して輝度の低い火炎片が多く、目視計測した火炎高さの再現性が低いと考えられたため、火炎高さは分析しないこととした。

Ⅱ・F では、30 秒頃から火炎の到達域が上昇し始め、60 秒頃に火炎高さがピークに達し、65 秒まで火源の間歇火炎とは無関係に、木材表面からの発炎が認められた。65 秒以降は、不燃の壁面において確認される火炎高さと同程度まで燃焼が後退した。実験終了時点では、高さ 3,000mm 程度まで表面の炭化が認められた。

Ⅱ・P215 では 42 秒頃から間歇火炎の到達域において羽板の隅角部を中心に発炎燃焼し、高さ 2,000mm 付近の羽板が 115 秒頃まで発炎燃焼した。以降、火炎高さは減衰し、120 秒以降は火源となる火炎の高さ以上での羽板の発炎燃焼が認められなくなった。実験終了後には 2,900mm 程度までの炭化が認められた。

Ⅱ・P90 では、実験開始 50 秒頃から急激に燃焼拡大を始めたが、102 秒時点では、表面のほぼ全体が炭化して消炎した。Ⅱ・P90 において、150 秒時点で火炎高さが急激に上昇しているのが認められるが、これは間歇火炎の予熱により、未炭化部の表面が 138 秒頃から 10 秒程度、発炎燃焼したことに起因している。

Ⅱ・P48 では 30 秒頃から間歇火炎の到達域において羽板自体からの発炎燃焼が認められ、78 秒頃に上端での発炎燃焼が認められた。その後 210 秒頃まで、不燃壁面を用いた予備実験で計測した火炎の存在域より上方でも、断続的に羽板からの発炎が認められた。Ⅱ・P90、Ⅱ・P48 の炭化は試験体上端まで達した。

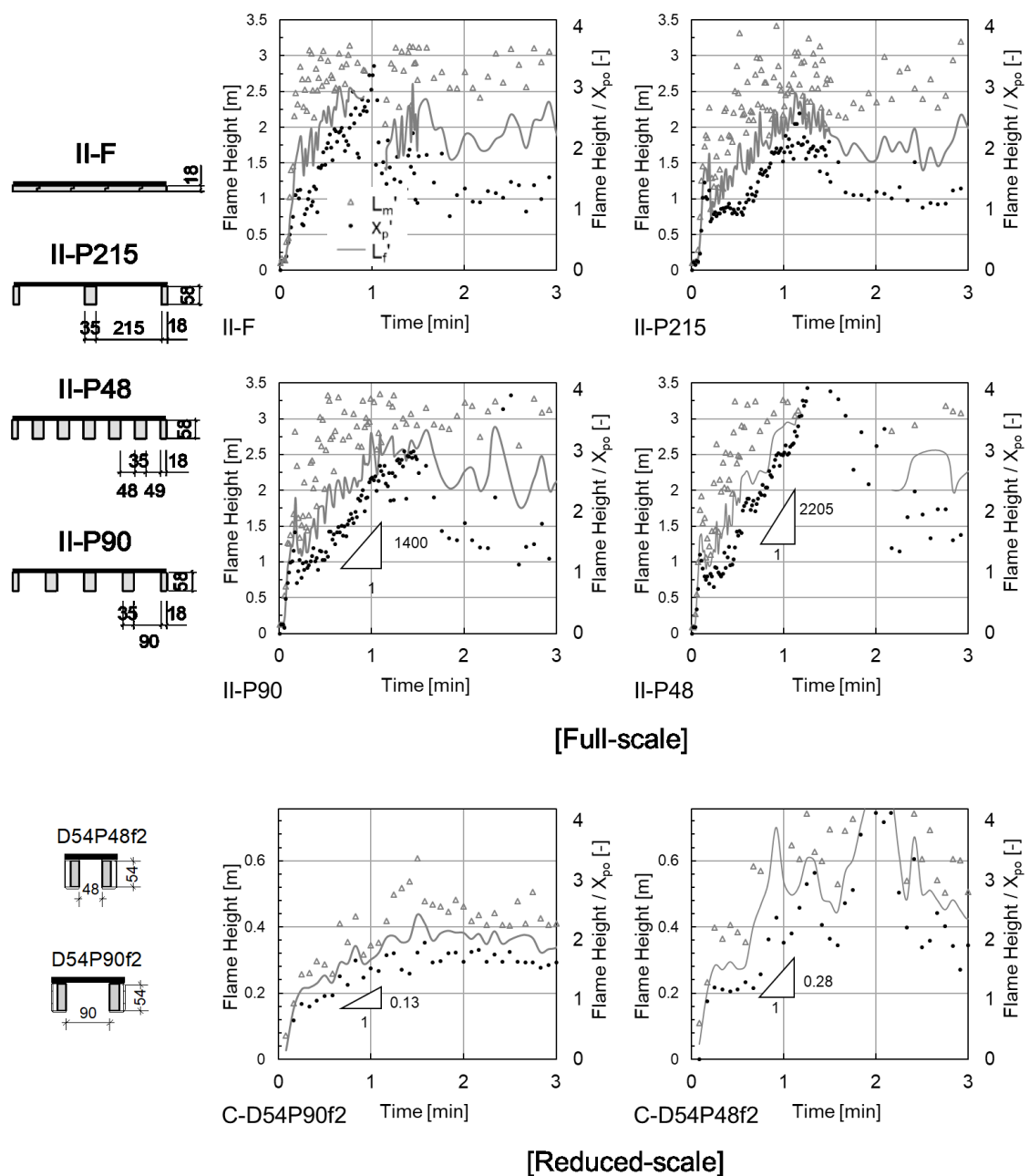


Fig. 4.3-16 Progress of flame spread (full scale)


































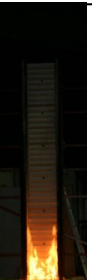

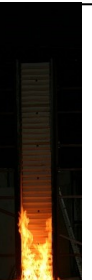

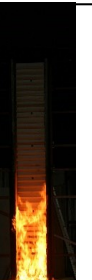


Time[s]	0	5	10	15	20	25	30	35	
F									→
X_p'	129	505	1115	787	957	1427	1785	1949	
II-P215									→
X_p'	111	822	1625	1184	1349	1179	1775	1685	
II-P90									→
X_p'	127	851	702	892	1082	1156	1070	1248	
II-P48									→
X_p'	89	1021	698	913	1129	958	1434	1884	
II-P48h									→
X_p'				Not Measurable					

Fig. 4.3-17a Flame images of series II

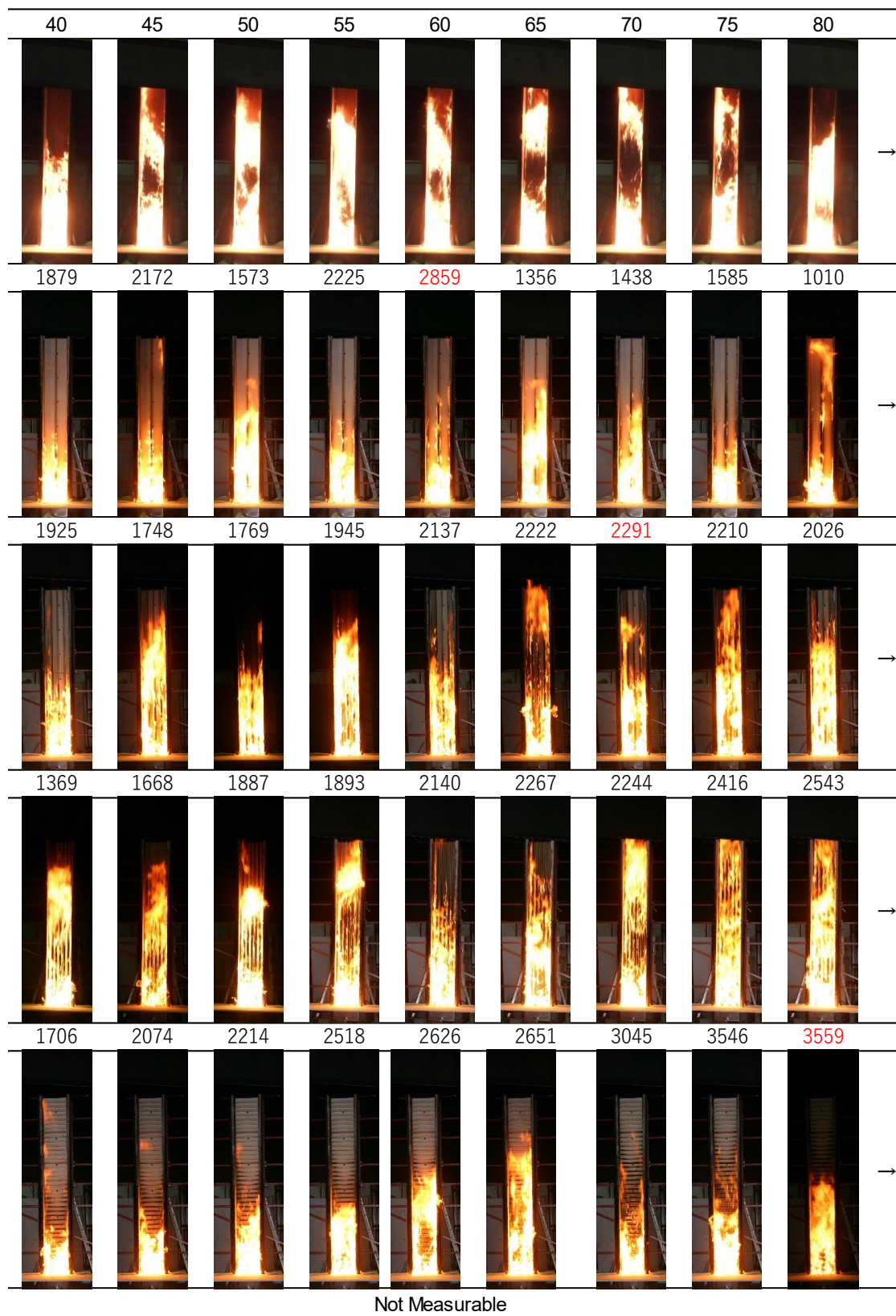


Fig. 4.3-17b Flame images of series II









































Time[s]	85	90	95	100	105	110	115	120
F								
X_p'	1914	1614	1631	759	1053	1143	962	954
II-P215								
X_p'	1859	1833	1054	1050	985	1096	1073	1008
II-P90								
X_p'	2457	2345	1432	1329	1301	1546	1306	1204
II-P48								
X_p'	3552	3273	2284	2816	2086	2618	2858	1196
II-P48h								
X_p'	Not Measurable							

Fig. 4.3-17c Flame images of series II

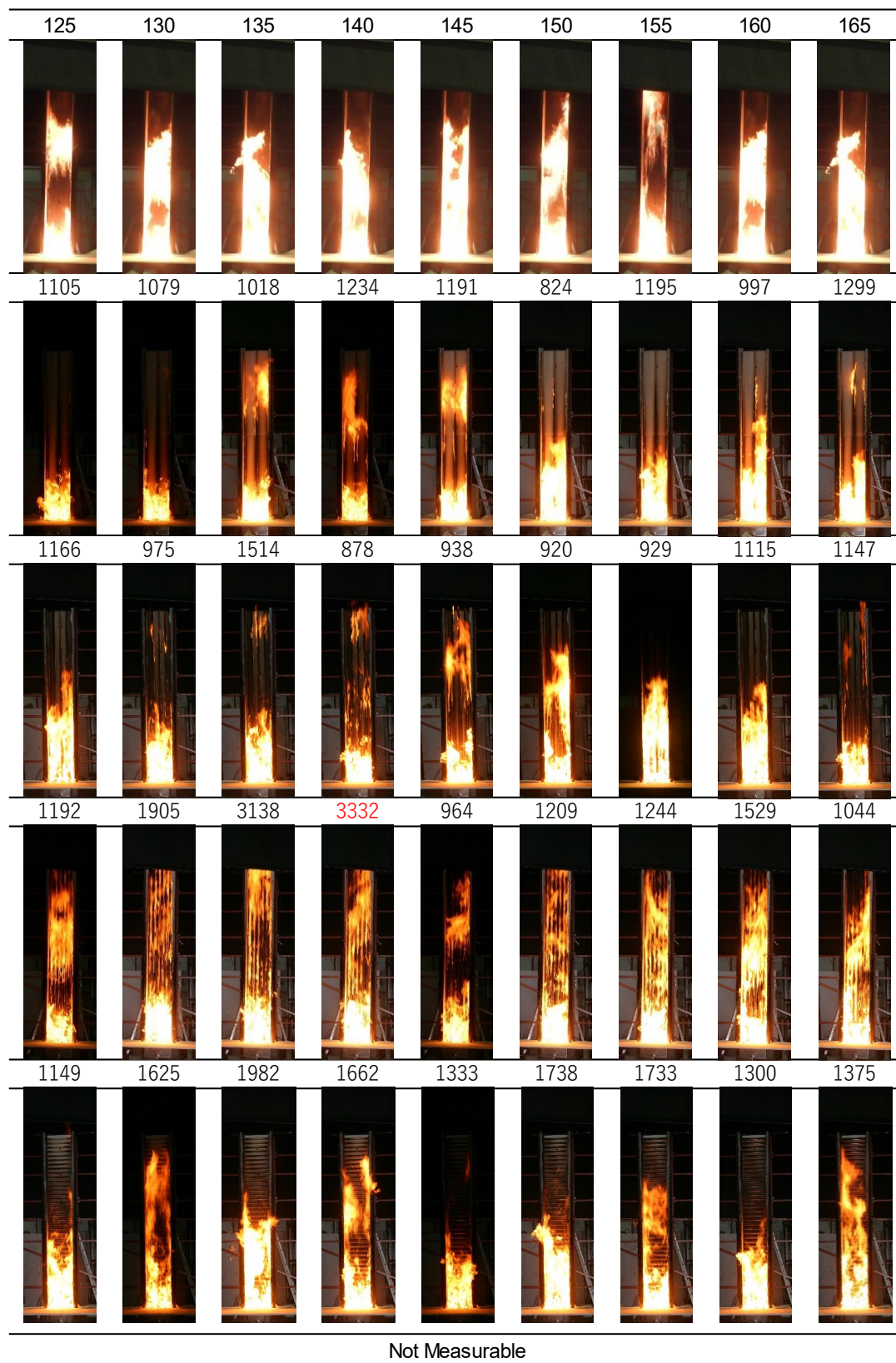


Fig. 4.3-17d Flame images of series II

(2) 火災安全性予測に対する要素実験の有効性

Fig. 4.3-16 中に X_p' の線形近似によって算出した火炎伝播速度を勾配記号で併せて示す。II-P48 に着目すると火炎高さは概ね直線的に増加しており、定性的には前章の小型実験における D54P48f2 の傾向と同様の結果になったが、火炎伝播速度は上端付近でも 2.2m/min と高い値を保った。これは小型実験 D54P48f2 で観測された値 (0.28m/min) の約 7.9 倍である。実大実験では火源火炎に曝される領域の長さが要素実験の約 5.3 倍であり、かつ溝に面しない部分が解放されていることで可燃物の周長も約 1.3 倍に増加しているため、要素実験と実大実験の火炎伝播速度の差異は加熱される可燃物表面積の差異によって概ね説明することが出来る。また、II-P48 において火炎高さが時間とともに直線的に増加し、ピーク後に上方での発炎燃焼が継続せず、燃え止まり高さが減退する傾向は、要素実験にて評価することが出来ていると言える。

また、この発炎燃焼の継続時間については、より上方の着火に対する影響因子と捉えられる。実大 II-P90 を見ると、150 秒時点での上端の発炎が 10 秒程度で収束しており、下方での着火時間と比較して十分短いことから、燃え止まり高さは 3400mm を大きく超えない ($X_{poff}/X_{po} \approx 4.0$) と推測される。また実験後半の羽板上部への着火を考慮しない場合には、燃え止まり高さは 2500mm 程度となり、 X_{poff}/X_{po} は 3 程度と計算される。いずれの値についても、要素実験の方が燃え止まり高さを低く評価していることが分かる。以上の結果についても Fig. 4.3-18 に併せてプロットしてある。

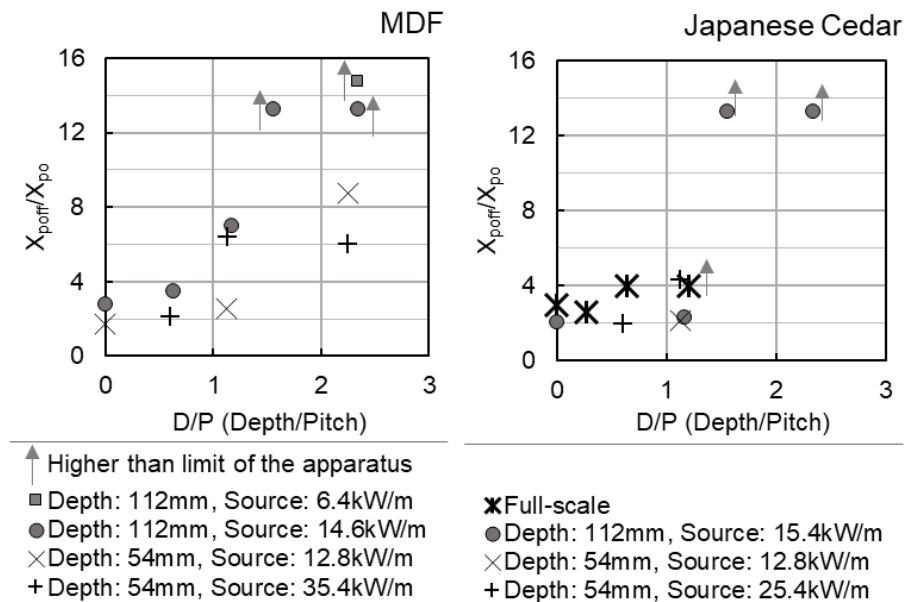


Fig. 4.3-18 Louver aspect and X_{poff}/X_{po} (including reduced scale experiments)

以上のように、火源となる火炎の到達しない範囲での羽板の発炎燃焼の継続は、小火源からの燃え広がりで評価出来ることが実験的に示唆された。一方で、要素実験の中には火源の発熱速度に律速されて $X_{\text{poft}}/X_{\text{po}}$ が低下するケースも生じた。ルーバーのように、溝の内部に火炎が存在する場合、溝内の空気を巻き込み尽くすか否かによって熱分解領域に対する火炎高さが異なつたと考えられ、とりわけ燃焼が加速的に促進されない仕様では、上記の値を一定とするために、加熱長さを増やす必要があるため、自己消火性の高いルーバーほど小火源での評価で乖離が生じやすくなつたと考えられる。なお本実験のように火源を平置きとしないことは、試験体への入射熱を確保しにくくなる点では弱点となりうるが、火源条件の妥当性を火炎の合流によって視覚的に判別できる点においては利点があると考えられる (Fig. 4.3-19 : D54P48 における火源発熱速度の影響の例)。

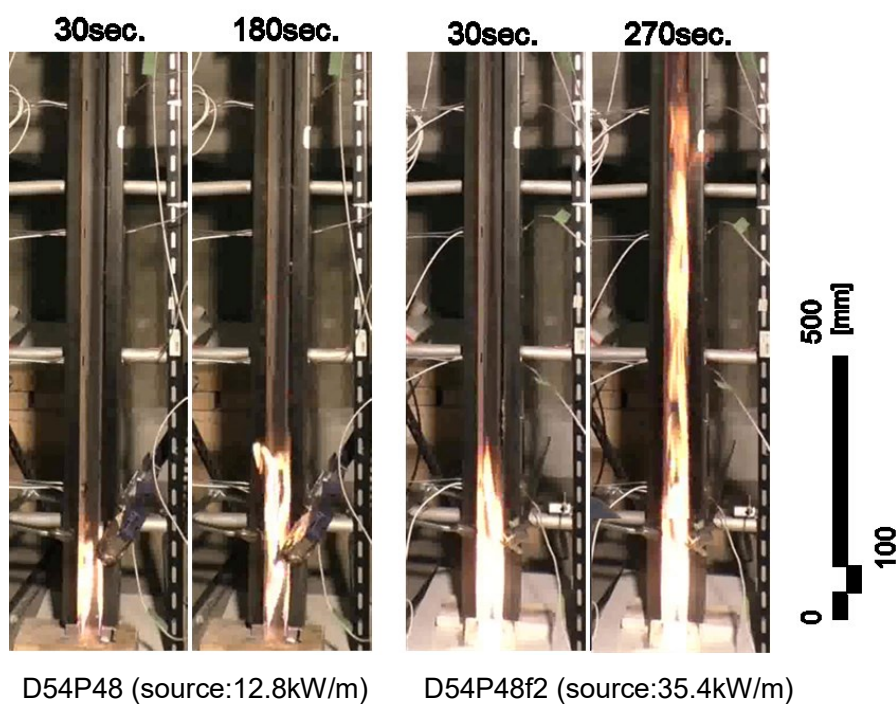


Fig. 4.3-19 Effect of source heat release rates on flame confluence

(3) 実大ルーバーの発熱性

火災時の区画内の延焼危険や避難安全に影響を及ぼす指標として、火源発熱速度を含めたピーク時の発熱速度や総発熱量が有用であると考えられる。また、発熱性の予測等に向けては、火源の寄与分を除いた分の発熱が整理できれば有用と考えられる。

各試験体の発熱速度および総発熱量の推移を Fig. 4.3-20 に示す。Table 4.3-1 に発熱速度のピーク値、実験開始から 300 秒および 600 秒までの総発熱量(THR300 および THR600)、平均発熱速度(実験開始 300 秒から 600 秒までの、発熱が概ね定常の状態における平均値)を示す。表の左側は火源の寄与分を含む発熱の特性値を示し、右側が火源の寄与分を除いた発熱の特性値を示している。また、() 内の数字は平板Ⅱ・F に対する比を示している。また、温度推移を Fig. 4.3-22(a~e)に、鉛直方向の温度分布を Fig. 4.3-23(a, b)に示す。

これら発熱の特性値について、火源の寄与分を除き、平板に対する増加率で整理した値(Table 4.3-1 の②~⑤)として表面積の増加率との関係で整理したものが Fig. 4.3-21 である。

Fig. 4.3-21a に示したピーク値に注目すると、Ⅱ・P90 より羽板間隔の広いルーバーおよびⅡ・P48h については表面積の増加率に比例しているといえる。Ⅱ・P48 のピークが表面積の増加よりも高い割合で増加しているのは、燃え止まり高さ自体が増加しているためと考えられる。

Fig. 4.3-21b, c に示した THR300、THR600 に注目すると、Ⅱ・P90 より羽板間隔の広いルーバーおよびⅡ・P48h の総発熱量は同一の回帰線上にあるが、羽板間隔が狭いほど、表面積の増加率から推定されるよりも高い発熱を示す傾向にある。

Fig. 4.3-21d に示した平均発熱速度(加熱開始 300~600 秒)に注目すると、ルーバーの場合には平板と比較して、表面積の増加から推定されるよりも一律に高い発熱速度を示しており、Ⅱ・P48、Ⅱ・P90、Ⅱ・P215 の 3 仕様における表面積増加率と発熱速度の増加率が比例関係を示している。これには、ルーバー形状の場合は羽板が 3 面加熱となり、深い亀裂を生じて上方での燃焼を維持しやすくなるなどの要因が考えられる。また、前項(1)の燃え拡がりに関する考察では影響が認められなかった相互放射も要因として挙げられる。

以上から、Ⅱ・P90 よりも羽板間隔の広い鉛直ルーバーにおけるピーク発熱速度については、平板と比較した場合の燃え止まり高さの増加を考慮せずに、表面積の増加率のみから推定可能であることが分かった。火源の発熱を含めると、Ⅱ・P90 の場合、平板と比較した時の発熱の増加はピーク値で 7%、燃焼初期 10 分の総発熱量で 14%程度の増加であった。一方で、羽板自体の燃焼に起因する発熱について、ピーク以降は鉛直ルーバー、水平ルーバーともに、平板から予測されるよりも高い値を示すことも明らかになった。

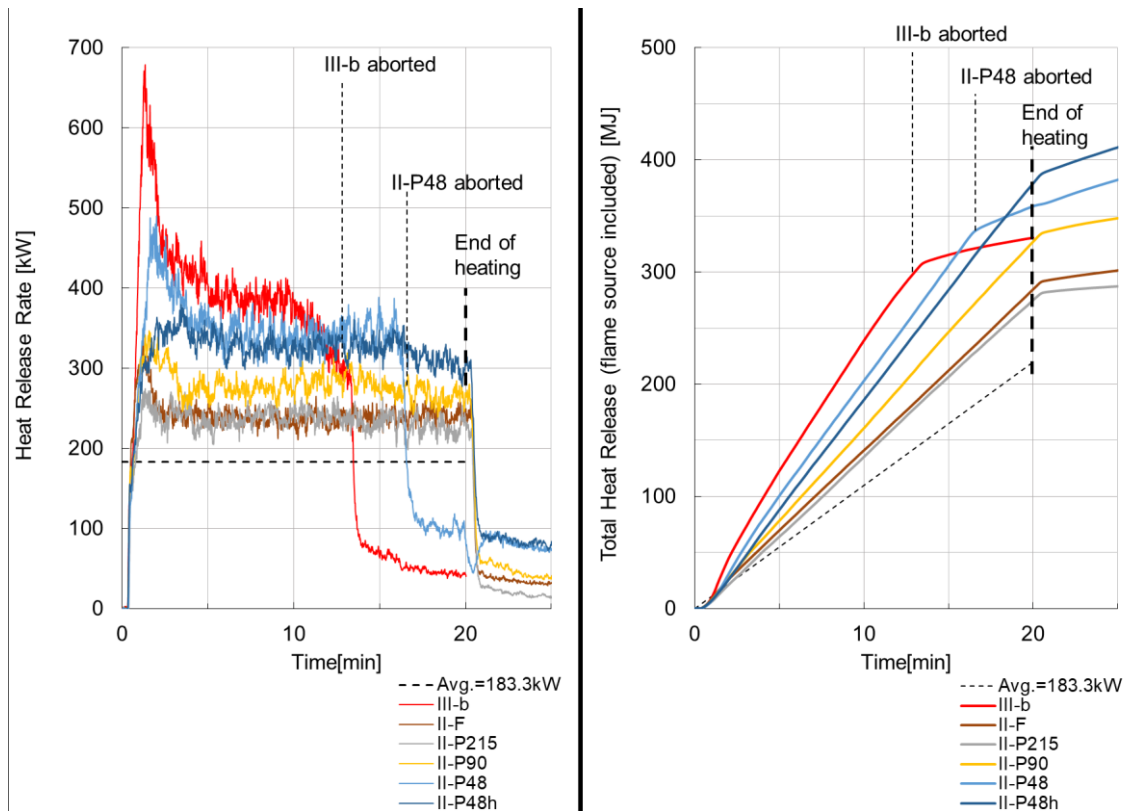


Fig. 4.3-20 Heat release rate and total heat release

Table 4.3-1 Characteristic results of louvers without eaves

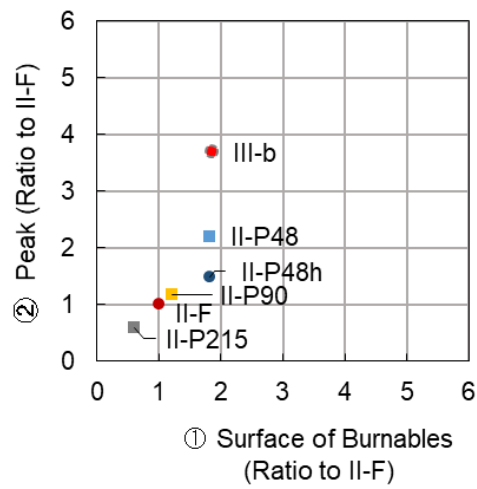
	① Surface of burnables [m ²]	Heat Release Rate (Flame Source Included)				Heat Release Rate (Flame Source Excluded)			
		Peak [kW]	THR300* ¹ [MJ]	THR600* ² [MJ]	Average* ³ [kW]	② Peak [kW]	③ THR300 [MJ]	④ THR600 [MJ]	⑤ Average [kW]
II-F	1.660(1.00)	315.0(1.00)	69.7(1.00)	140.9(1.00)	237.3(1.00)	132.0(1.00)	16.7(1.00)	32.9(1.00)	54.0(1.00)
II-P215	1.003(0.60)	260.0(0.83)	64.1(0.92)	134.8(0.96)	235.7(0.99)	77.0(0.58)	11.1(0.67)	26.8(0.82)	52.3(3.97)
II-P90	2.005(1.21)	339.0(1.08)	78.1(1.12)	160.8(1.14)	275.7(1.16)	156.0(1.18)	25.1(1.50)	52.8(1.61)	92.3(1.71)
II-P48	3.008(1.81)	474.0(1.51)	100.7(1.45)	203.2(1.44)	341.7(1.44)	291.0(2.21)	47.7(2.86)	95.2(2.89)	158.3(2.93)
III-b	3.088(1.86)	671.0(2.13)	122.6(1.76)	238.6(1.69)	386.7(1.63)	488.0(3.70)	69.6(4.17)	130.6(3.97)	203.3(3.77)
II-P48h	3.008(1.81)	379.0(1.20)	88.2(1.27)	186.2(1.32)	326.7(1.38)	196.0(1.49)	35.2(2.11)	78.2(2.38)	143.3(2.65)

Values in parenthesis represents the ratio to II-F.

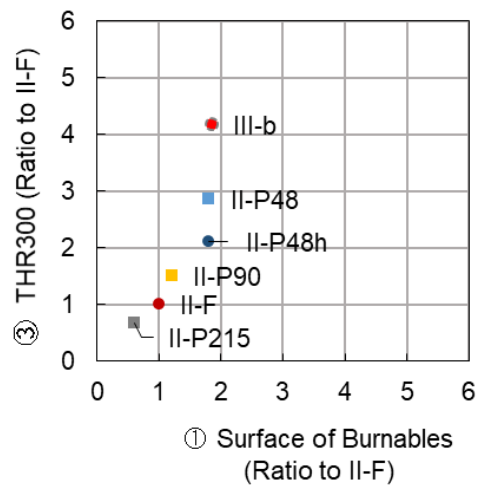
*1 Total heat release up to 300 sec.

*2 Total heat release up to 600 sec.

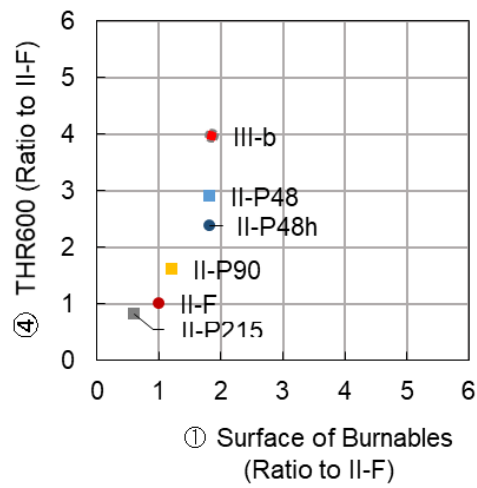
*3 Average heat release rate from 300 to 600 sec.



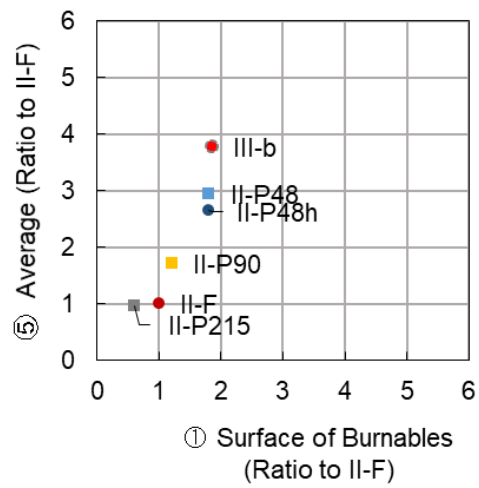
a



b

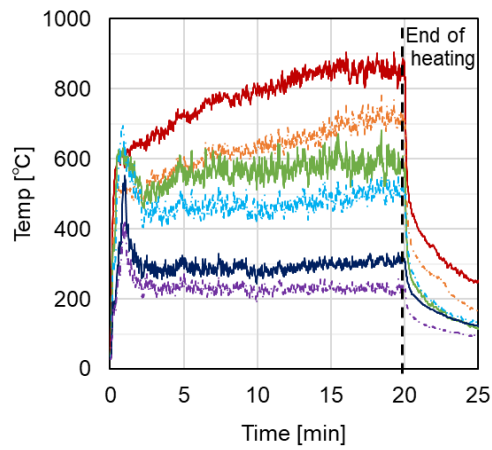


c



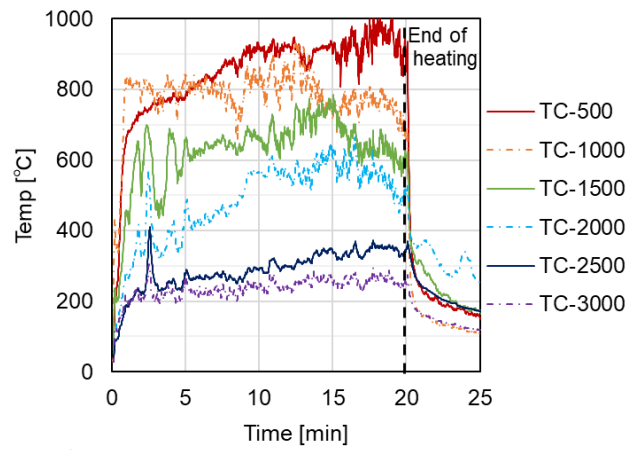
d

Fig. 4.3-21 Heat release specifications and surface of burnables (ratio to II-F)



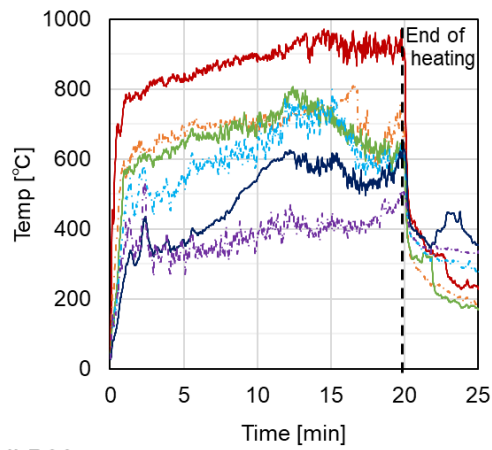
II-F

a



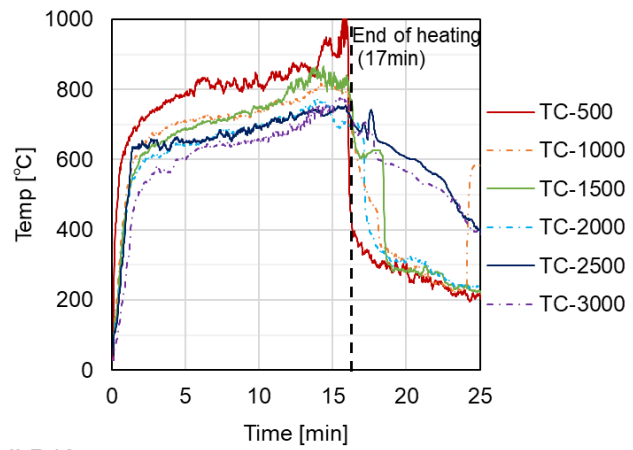
II-P215

b



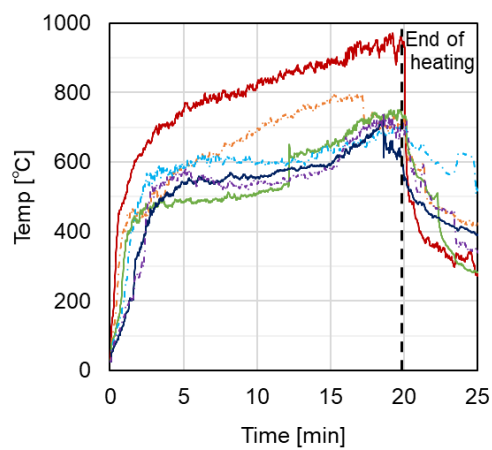
II-P90

c



II-P48

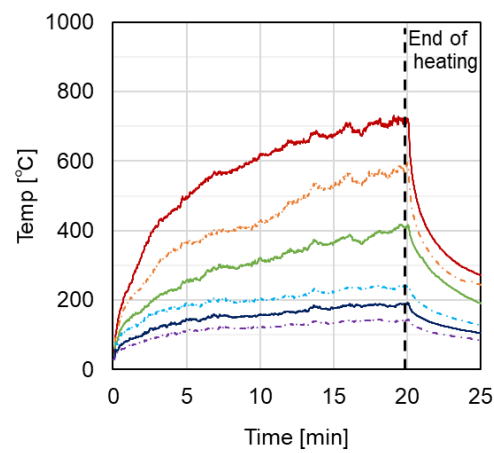
d



II-P48h

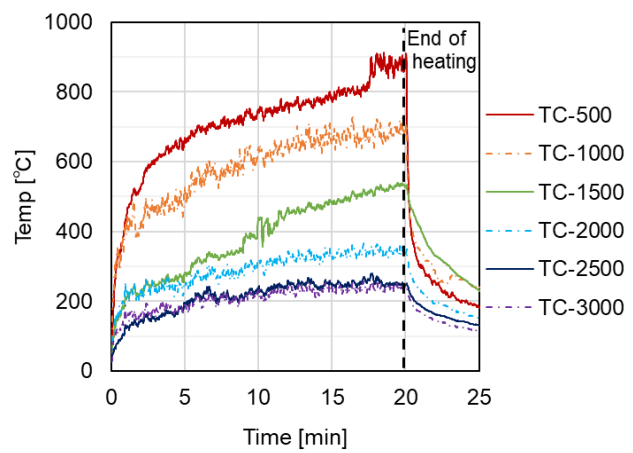
e

Fig. 4.3-22 (a~e) Surface temperature of series II



II-F-fr

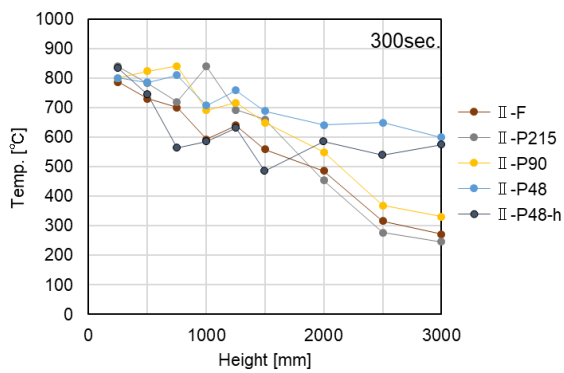
e



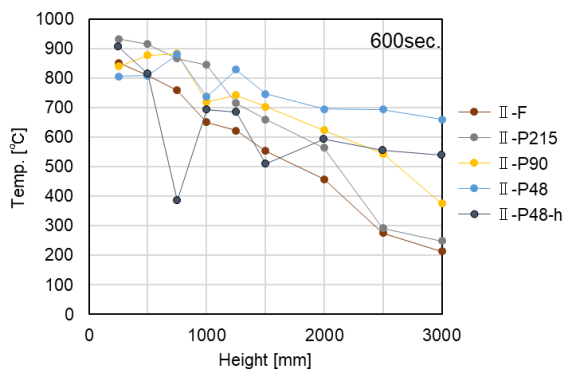
II-P48-fr

f

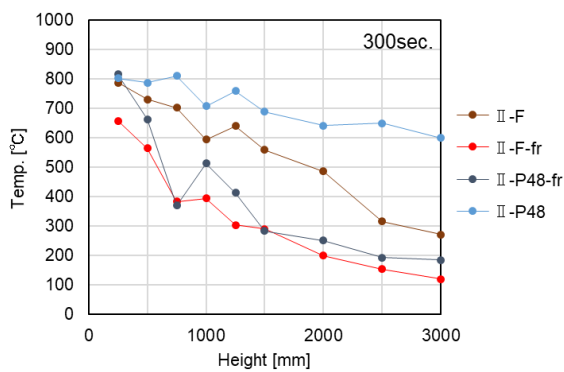
Fig. 4.3-22(f, g) Surface temperature of series II



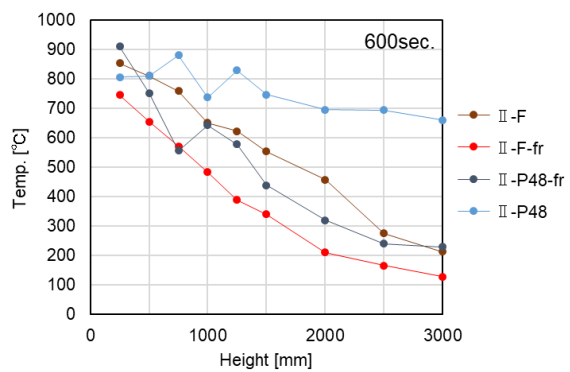
a



b



c



d

Fig. 4.3-23 Vertical temperature distributions of series II

(4) 難燃処理の効果 (II-P48, II-P48-fr)

Fig. 4.3-24 に難燃処理を施した平板(II-F-fr)およびルーバー(II-P48-fr)の発熱速度および総発熱量の推移を示す。対照として、無処理材を同一形状に組んだ仕様の結果(II-F および II-P48)を併記する。これらの実験経過については資料編(7)に掲載する。

また、Table 4.3-2 および Fig. 4.3-25 に前項(3)と同じ要領で整理した発熱の特性値を示す。Table 4.3-2 に発熱のピーク値、実験開始から 300 秒および 600 秒までの総発熱量 (THR300 および THR600)、平均発熱速度 (実験開始 300 秒から 600 秒までの、発熱が概ね定常の状態における平均値)を示す。表の左側が火源の寄与分を含む発熱の特性値、右側が火源の寄与分を除いた発熱の特性値となっている。また、() 内の数字は平板 II-F に対する比を示している。

なお、難燃処理仕様のピーク値についてはいずれも加熱終了直前にピーク値を観測しているので、その値を採用している。従って、これらは板材の炭化が進行してからの特性値として解釈されたい。また、温度推移を Fig. 4.3-22(f, g)に、鉛直方向の温度分布を Fig. 4.3-23(c, d)に示す。

温度推移および鉛直方向の温度分布から、ルーバー形状とした難燃処理木材では加熱が進むに従い、平板よりも高い表面温度を示す領域が増加することが分かる。一方で、その発熱に対する影響は、Table 4.3-2 に示すように、例えば 300 秒～600 秒にかけての発熱速度で見ると、表面積の増加から想定される発熱より 7%増加する程度である。また、加熱開始 600 秒までの総発熱量で見た場合にはさらに影響が小さくなっている。これらから、発炎燃焼を抑制するのに十分な難燃薬剤の量を確保した難燃処理木材の場合、その発熱に対する形状の影響は無処理木材よりも小さく、表面積の増加率を考慮することによって推定できると言える。

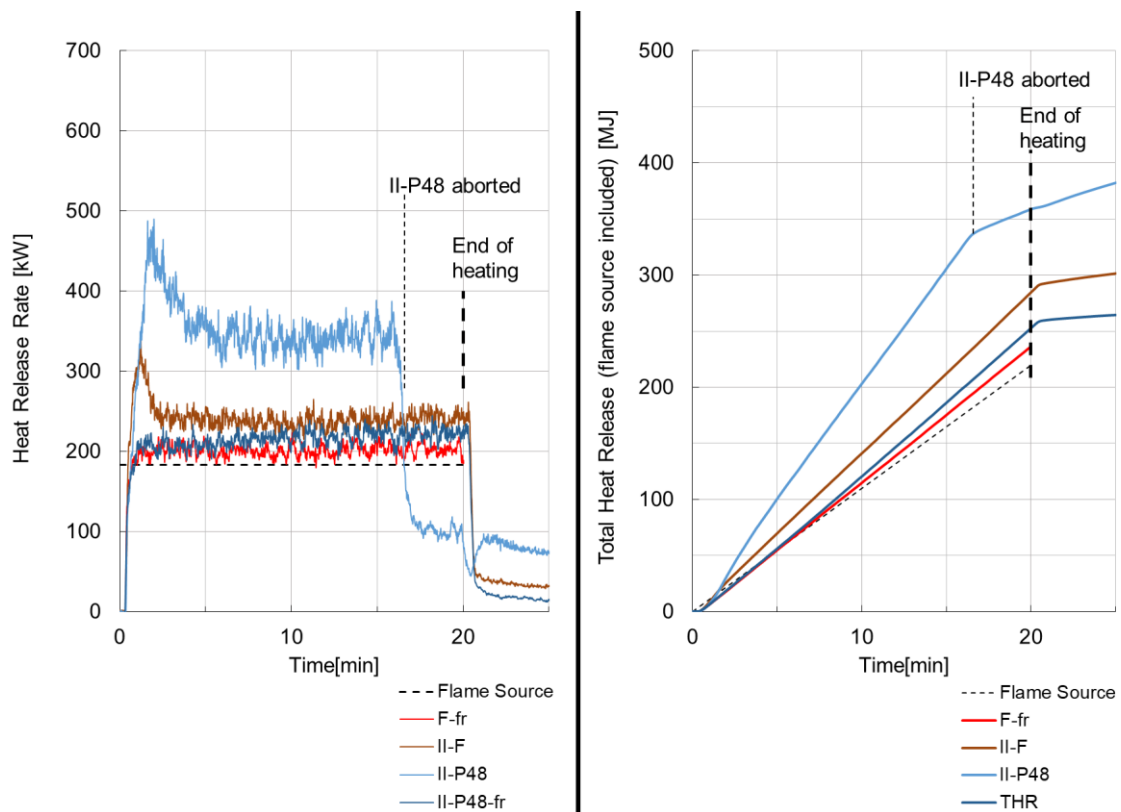


Fig. 4.3-24 Heat release rate (fire-retardant treated)

Table 4.3-2 Characteristic results of specimens with or without fire-retardant treatment

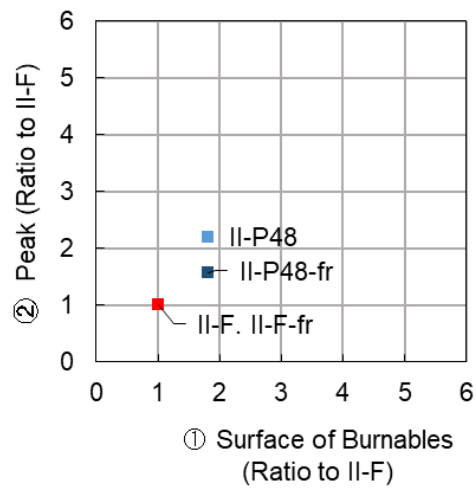
	① Surface of burnables [m ²]	Heat Release Rate (Flame Source Included)				Heat Release Rate (Flame Source Excluded)			
		Peak [kW]	THR300* ¹ [MJ]	THR600* ² [MJ]	Average* ³ [kW]	② Peak [kW]	③ THR300 [MJ]	④ THR600 [MJ]	⑤ Average [kW]
II-F	1.660(1.00)	315.0(1.00)	69.7(1.00)	140.9(1.00)	237.3(1.00)	132.0(1.00)	16.7(1.00)	32.9(1.00)	54.0(1.00)
II-P48* ⁴	3.008(1.81)	474.0(1.51)	100.7(1.45)	203.2(1.44)	341.7(1.44)	291.0(2.21)	47.7(2.86)	95.2(2.89)	158.3(2.93)
II-F-fr	1.660(1.00)	218.0(1.00)	55.1(1.00)	114.9(1.00)	199.3(1.00)	35.0(1.00)	2.1(1.00)	6.9(1.00)	16.0(1.00)
II-P48-fr* ⁴	3.008(1.81)	238.0(1.09)	56.1(1.02)	120.4(1.05)	214.3(1.08)	55.0(1.57)	3.1(1.48)	12.4(1.80)	31.0(1.94)

*1 Total heat release up to 300 sec.

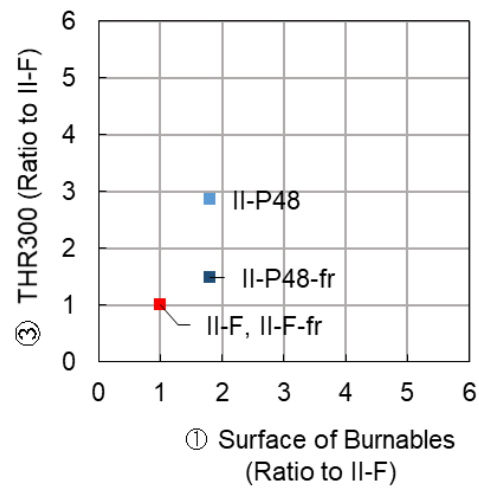
*2 Total heat release up to 600 sec.

*3 Average heat release rate from 300 to 600 sec.

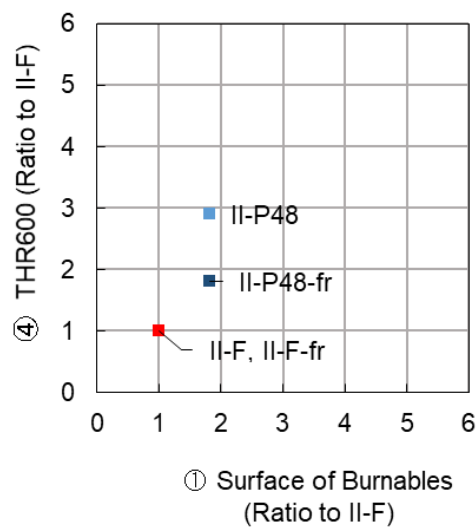
*4 Values in parenthesis represents the ratio to II-F or II-F-fr.



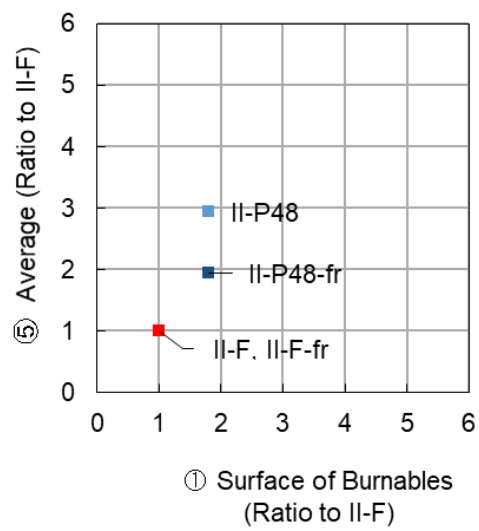
a



b



c



d

Fig. 4.3-25 Heat release specifications and surface of burnables (ratio to II-F)

(5) 燃焼抑制に対する底の効果

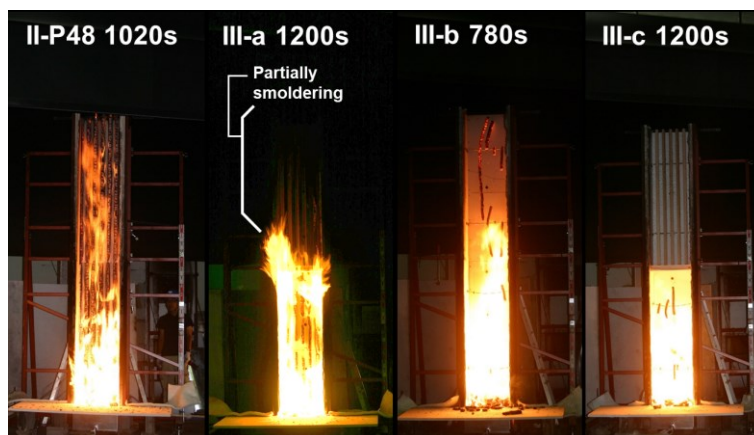


Fig. 4.3-26 Burnout state at the end of external heating

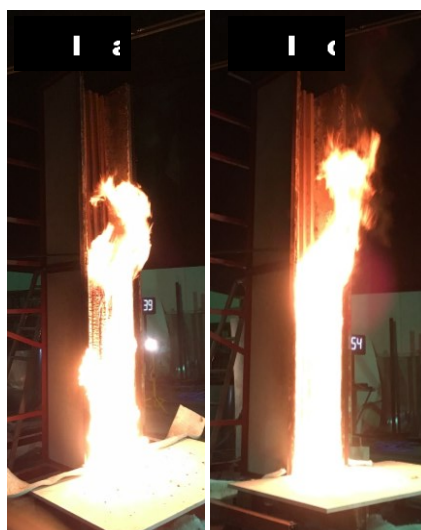


Fig. 4.3-27 Comparison of flame trajectories

Table 4.3-3 Summary of series III compared to II-P48

Specimen	II-P48	III-a	III-b	III-c
Total Surface Area of Blades [m ²]	3.01 (1.00)* ¹	2.95 (0.98)	3.09 (1.03)	3.03 (1.01)
Total Volume of Blades [m ³]	0.0414 (1.00)	0.0396 (0.96)	0.0337 (0.81)	0.033 (0.80)
Peak Heat Release* ² [kW]	293 (1.00)	156 (0.53)	484 (1.65)	241 (0.82)

*1 Values in parentheses represent the ratio to II-P48.

*2 Heat release of fire source is excluded.

Fig. 4.3-26 に、各仕様の実験終了時の状況を示す。これらの詳細な経過については資料編(8)に示す。Fig. 4.3-27 に、底を設置した仕様にて発熱速度が最大となった時点（Ⅲ-a は 1.7 分、Ⅲ-c は 0.9 分）の状況を示す。背壁の有無に関わらず、出寸法 200mm の底は有効で、Ⅲ-a、Ⅲ-c とも底上方での羽板からの発炎は認められなかった。この結果、最大発熱速度も Table 4.3-3 に示す通り、底を設けない場合の約半分に低減された。また、Fig. 4.3-27 において火炎の性状に注目すると、背壁ありのⅢ-a では火炎が背壁方向に吸い寄せられているのが分かる。実際に、加熱終了後(Fig. 4.3-26)には底の上方 500mm ほどの箇所に部分的な炭化および赤熱が認められた一方で、背壁なしのⅢ-c では、底上方の全体において健全であった。

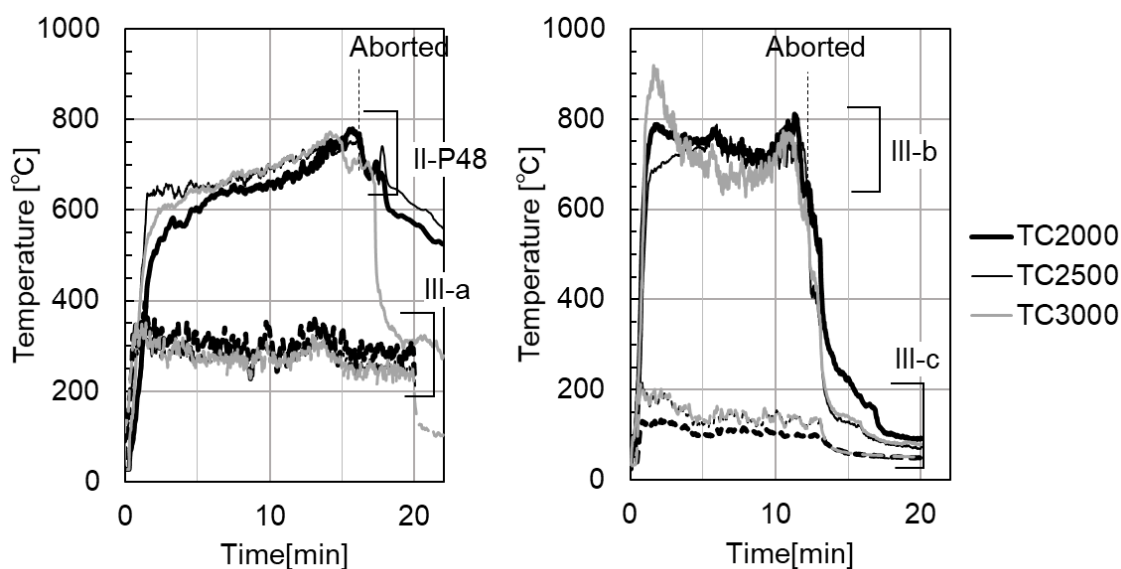


Fig. 4.3-28 Eaves' effect on temperatures above

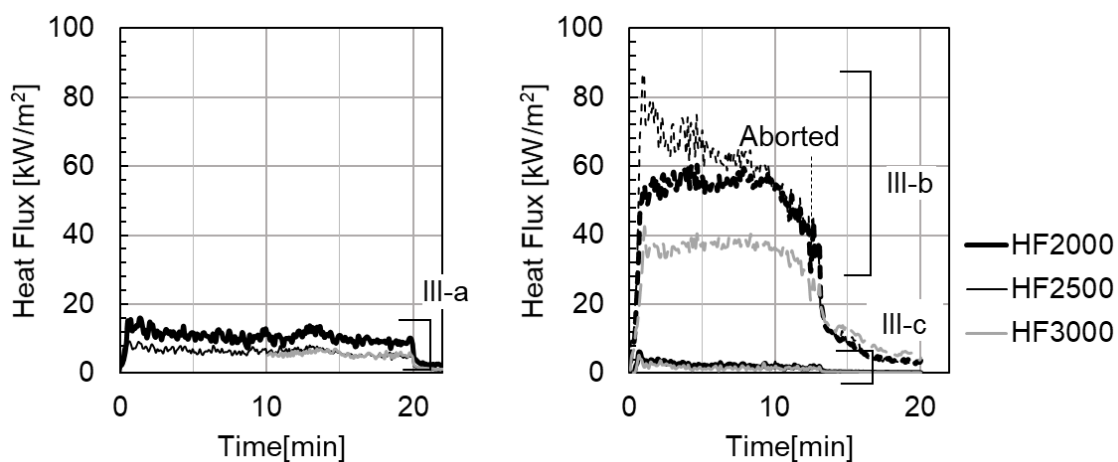


Fig. 4.3-29 Eaves' effect on heat flux above

Fig. 4.3-28 に TC-2000 以上の高さにおける温度推移を示し、Fig. 4.3-29 に HF-2000 以上の高さにおける後壁への入射熱流束の推移を示す。また、これら結果の詳細は資料編(9)に示す。上述した火炎の性状と同様に、底よりもやや上方に離れた部分での温度の方が高くなる傾向が見られ、Ⅲ-a では最高 373℃(TC-2000, 85 秒)に達しているのに対して、Ⅲ-c では最高 199℃(TC-3000, 103 秒)まで抑制された。

羽板先端からの底の出寸法や、側壁との位置関係は仕様間で同一としたことから、この際には以下の理由が考えられる。まず底下方においてはルーバー面よりも背壁のコアンダ効果が大きいことにより、火炎が後方を流れて底の実長が伸びたと考えられる。また底上方においては、ルーバー面自体に通気性があることにより火炎が底上方で離隔されやすくなったことも底の効果の向上に寄与したと考えられる。また、熱流束の値については、仕様Ⅲ-b では最大 90kW/m²に達しているが、仕様Ⅲ-c ではルーバーの遮蔽効果も寄与して、最大でも 7kW/m² (HF-3000, 40 秒) まで低減されている。火災拡大防止のための底は、ルーバー架構において設置の効果が高いといえる。ただし、底を設けたことによって底下にブルーミングが滞留して側方火炎伝播を生じる可能性もあるから、幅広の試験体を用いた検証も行つて、このようなことが生じない底形状を検討する必要がある。

4.4 まとめ

火災時に燃焼拡大し易いと想定される鉛直ルーバーを対象に要素実験と実大実験を行い、以下を明らかにした。

- ・ルーバー羽板間の溝のアスペクト D/P (Depth/Pitch) で燃焼を整理すると、 $D/P=0.65$ のときの燃え止まり高さは羽板単独で燃焼する場合の 1.3 倍程度である。 $0.65 < D/P$ では溝幅に対する奥行の増加とともに燃え止まり高さが著しく増加し、 $1.5 < D/P$ かつ平面的に大きいルーバーでは、上方での発炎燃焼が維持される。これは実測した羽板温度から推定するに、既燃部に由来する放射が木材の着火限界を上回ることが条件となっていると考えられる。反対に、同一の溝のアスペクトをもつルーバーでも、平面的に小さい場合は羽板の温度上昇が緩慢になり、上方での発炎燃焼が維持されにくくなる。
- ・奥行約 110mm のルーバーにおける熱流束の分布は、羽板温度から推定される放射熱収支を平坦な壁面の入射熱分布に加算することで推定可能であった。反対に、奥行約 50mm のルーバーでは、放射の寄与を加算した値より高い入射熱流束が実測された。このようなパターンについて伝熱機構を解明するためには、プルーム域でのガス放射などの要因についても詳細に検討を行う必要があると考えられる。
- ・不燃材の壁面に直付けした溝内の奥行 60mm、ピッチ 90mm 程度のルーバーの燃焼性を平坦な壁面と比較した場合、火源発熱速度を含めたピーク時発熱速度は 7% の増加に留まり、火源発熱速度を含めた 10 分間の総発熱量は 14% の増加に留まる。
- ・壁面に直付けされていないルーバーに対して庇を設置した場合、壁面に同一の出寸法で設置した場合よりも延焼抑制効果が高まることが示された。

なお、本実験で有効とされた庇寸法は実大区画実験に基づく知見³²と比較して小さいが、この理由については、本実験の方が火炎が薄いことに加え、火炎の形態係数が、一次元の実験装置として部分実験を行ったことにより低下した結果と考えられる。一方で、この差異は実際の火災安全にも役に立つ可能性がある。つまり、庇の立体形状の制御により火炎の形態係数を小さくするといった工夫である。また、可燃壁面と庇の組み合わせは、庇下に滞留するプルームが殊更に問題となり、側方火炎伝播につながる可能性がある。以上の可能性については、幅広の試験体を用いた検証を行っていく必要がある。

文 献

- 1 清水賢, 中村美紀, 兼松学, 野口貴文, 吉岡英樹, 萩原伸治, 杉田敏之, 西尾悠平, 田村政道, 松本悠実: 難燃処理木材ファサードの促進劣化試験方法に関する基礎的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集(防火), pp.25-26 (2017).
- 2 原田寿郎, 上川大輔, 亀岡祐史: 難燃処理塗装木材の 5 年間屋外暴露後の薬剤残存量, 日本建築学会大会学術講演梗概集(防火), pp.19-20 (2017).
- 3 河原崎政行, 平館亮一, 平林靖, 菊地伸一, 大宮喜文, 李在永, 野秋政希, 中村昇: 薬剤処理防火木材の燃焼抑制作用の経年劣化(第 1 報)屋外暴露 60 ヶ月における薬剤の種類と塗装の影響, 木材学会誌 **64**(3), pp105-114 (2018).
- 4 原田寿郎, 上川大輔, 片岡厚, 石川敦子, 亀岡祐史: 屋外暴露後の難燃処理塗装木材の耐候性と防火性能, 木材保存 **39**(1), pp.16-23 (2013).
- 5 高瀬椋, 石川敦子, 上川大輔, 松永浩史, 原田寿郎: 難燃処理・塗装木材における雨がかり時の吸湿と薬剤溶脱の関係, 第 69 回日本木材学会年次大会発表要旨集 N15-P-23 (2019).
- 6 L., Orloff, J. DeRis and G.H. Markstein: Upward turbulent fire spread and burning of fuel surface, Proceedings of 15th Symposium on Combustion. The Combustion institute, Pittsburgh, PA, 183-192 (1975).
- 7 M., Kokkala, D., Baroudi and W. J., Parker: Upward flame spread on wooden surface products: Experiments and Numerical modelling, Proceedings of the 5th international symposium, 309-320 (1997).
- 8 J., Quintiere, M., Harkleroad and Y., Hasemi: Wall flames and implications for upward flame spread, *Combustion Science and Technology* **48**(3-4), 191-222 (1986).
- 9 Y., Hasemi, N., Yasui and M., Yoshida: Upward flame spread along a vertical solid for transient local heat release rate, Proceedings of the 4th international symposium, 385-396 (1994).
- 10 E.G., Brehob and A.K., Kulkarni: Experimental measurements of upward flame spread on a vertical wall with external radiation, *Fire Safety Journal* **31**, 181-200 (1998).
- 11 菊地伸一, 長谷見雄二: 木材の燃焼発熱性および火炎伝播性に及ぼす表面形状の影響, 木材学会誌 **50**(2), 99-105 (2004).
- 12 Hasemi, Y., Yoshida, M., Yasui, N., Parker, W.J.: Upward Flame Spread Along a Vertical Solid for Transient Local Heat Release Rate, Proceedings of the Fourth Symposium of International Association for Fire Safety Science, 385-396 (1994).
- 13 Drysdale, D. : An Introduction to Fire Dynamics, John Wiley & Sons (1985).
- 14 Mudan, K.S.: Thermal radiation hazards from hydrocarbon pool fires, *Progress in*

energy and Combustion Science **10**, 59-80 (1984).

- 15 Fluke Process Instruments: 放射率表, <https://www.flukeprocessinstruments.com/ja/about-us/emissivity-values-non-metals>, (最終閲覧日 2020.1.1).
- 16 センサテック株式会社: 赤外線温度センサ, https://www.sensatec.co.jp/user_data/hygrothermal_precautions.php, (最終閲覧日 2020.1.1).
- 17 日本アビオニクス株式会社: 各物質の放射率, <http://211.123.209.2/products/infrared/support/thermo/technical/emissivity.html>, (最終閲覧日 2020.1.1).
- 18 日本火災学会: 『火災便覧』第4版, 共立出版(2018), p.106.
- 19 日本産業規格: JIS A 5905:2003 繊維板 <https://www.jisc.go.jp/pdfa6/PDFView/ShowPDF/qgEAACtqklRN3172itsW>, (最終閲覧日 2020.1.1).
- 20 National Institute of Health: ImageJ User Interface, <https://imagej.nih.gov/ij/docs/guide/146-Part-IV.html>, (Accessed on 2019.12.15).
- 21 K.C., Tsai: Orientation effect on cone calorimeter test results to assess fire hazard of materials, *Journal of Hazardous Materials* **172**(2-3): 763-72 (2009).
- 22 原田浩司, 井上正文, 田中圭, 中村昇, 池田元吉, 板垣直行: 低輻射加熱を受けた木材の燃焼性能および強度性能-体育館等の梁の木造化促進のための基礎的研究, 日本建築学会構造系論文集 **81**(727), 1491-1500 (2016).
- 23 H.C., Tran and R.H., White: Burning rate of solid wood measured in a heat release rate calorimeter, *Fire and Materials* **16**, 197-206 (1992).
- 24 安井昇, 長谷見雄二, 吉田正志, 若松孝旺: 木造壁面上の上方火炎伝播性状, 日本建築学会関東支部研究報告集, 169-171 (1991).
- 25 About FFmpeg, <https://www.ffmpeg.org/about.html>, (Accessed on 2019.12.15).
- 26 Siegel, R., Howell, J. R.: Thermal Radiation Heat Transfer III (1971).
- 27 株式会社アプリアフト: Grasshopper, <https://www.applicraft.com/products/rhinoceros/grasshopper/>, (Accessed on 2019.12.15).
- 28 物理学史研究刊行会: 『熱輻射と量子』(物理学古典論文叢書 1), 東海大学出版会
- 29 斎藤孝三, 江守一郎: 鉄道車両火災の模型実験と相似則, 日本機械学会論文集 B 編 **46**(407), 1348-1354, (1980).
- 30 National Bureau of Standards: Fire Performance of Furnishings as Measured in the NBS Furniture Calorimeter, Part I, NBSIR 83-2787 (1983).
- 31 K.C, Tsai: Influence of sidewalls on width effects of upward flame spread, *Fire Safety Journal* **46**(5), 294-304 (2011).
- 32 神戸麻千子, 長谷見雄二, 安井昇: 火災室からの開口噴出火炎による外壁上方の加熱条件に関する研究: 実大居室火災実験結果に基づく検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集(防火), 223-224 (2015).

第 5 章 総括

木材は燃える、腐る、狂うという特性があり、いずれも建築部材として長期間使用するには不都合な特性であるので、それぞれを補うように化学修飾の研究がなされてきている。一方で、こうした材料改質は基本的に費用がかかるものが多く、技術的に実現することと普及の間には大きな隔たりがある。木現しをしたいと思ってもらうためには、なるべく加工度の低い木材を適材適所に提案する取り組みを、もっと積極的に行っていく必要があるとの考えのもと、現行法規の枠組みから確実に明らかにしなければならない材料的課題と、性能の見地から今後、開拓の余地がありそうな木材利用の2面に取り組んだ。

本論文の前半では、一般的な天井高の居室等に用いられる仕上げ材などを対象に、準不燃性能、難燃性能で流通する製品と同等の薬剤量を注入した難燃処理木材において生じうる薬剤量の不均一性が燃え広がりに及ぼす影響を明らかにした。すなわち、蛍光 X 線分析装置を用いた難燃処理木材中の薬剤分布を定量的に可視化するための検量線を作成し、これを用いて難燃処理木材の材中の薬剤分布と発熱特性および燃え広がりを詳細に関連付けた。

準不燃および難燃性能として流通する難燃処理木材とほぼ同等の薬剤量とした試験体を用いて行った模型箱試験の結果から、いずれのカテゴリを目標とした難燃処理木材においても、火災初期 10 分は材表に薬剤が偏在する方が区画内温度、発熱とも抑制される傾向であることを示した。以上の結果から、材表方向への薬剤の集積は、初期の避難安全に対して問題とならないと考えられることを示した。

また薬剤が材表に集積した材について、コーンカロリメーター試験の 10 分以前では均一に薬剤が分布する場合と差異が認められない一方、実火災に近い模型箱試験では安全側の結果であったことから、品質管理を行う上では、コーンカロリメーターによって性能を確認することで、実火災ではより安全な状況を保証できるといえることを明らかにした。試験体製作の過程では、難燃処理木材を想定通りの薬剤分布に制御する上で有用な示唆も得られた。

本論文の後半では、火災拡大性状を把握・制御すべき対象として木製ルーバーを取り上げ、無処理木材自身の自己消火性の範囲内で燃焼を局所化できる条件について明らかにするとともに、小型実験の有用性を示した。また、不燃材を用いた庇状の架構で延焼を防止する場合の考え方については、従来の平坦な壁面に対する設計法の範囲内で安全性を確保できることを実証した。

小型実験より、ルーバー羽板間の溝のアスペクト D/P (Depth/Pitch) で燃焼を整理すると、 $D/P < 0.65$ で燃え止まり高さは平板と同程度となり、 $0.65 < D/P$ でアスペクトの増加とともに燃え止まり高さが著しく増加すること、 $1.5 < D/P$ かつ平面的に大きいルーバーの燃焼では、上方での発炎燃焼が維持されることが明らかになった。また、絶対寸法の大小によっては、羽板温度から推定される放射熱収支を平板の入射熱に加算することで推定可能であることを明らかにした。

実大実験より、不燃材の壁面に直付けした溝内の奥行 60mm、ピッチ 90mm 程度が燃烧した際のピーク時発熱速度は、火源発熱速度を含めて 7%の増加に留まることを明らかにした。さらに、壁面に直付けされていないルーバーに対して庇を設置した場合、壁面に同一の出寸法で設置した場合よりも延焼抑制効果が高まることが示された。

ルーバーをより実用的なものとしていくにあたって、可燃の壁面と庇を組み合わせた実大実験の例がない。一般に、庇の下面は平坦に設計されることが多いが、可燃の壁面と組み合わせるためには改良の余地があるといえる。その理由の 1 つは、庇下方に熱気が滞留しやすいことで、当該部位が木材等で仕上げられている場合に側方に燃え広がる懸念である。もう一点は、火炎を面内一様に投げ出すと、壁面への入射熱のうち輻射を抑制する効果がそれほど期待できないことである。以上の観点から、まずは平坦な庇面下での側方火炎伝播を検証しながら、必要に応じて庇の下面を山形にするなど、立体形状の改良を加える、といった発展が考えられる。

謝辞

筆者のテニユアトラック研究員という立場を理解して頂き、博士課程への入学当初からさまざまに無理を聞き入れて頂きながら、ご指導を賜りました指導教官・主査である長谷見雄二先生、ならびに本論文がより良いものになるようご指導くださった副査の先生方：田邊新一 先生、高口洋人 先生、上川大輔 博士に感謝申し上げます。

研究者として必要な業務の手ほどきを頂いた松永浩史 室長、上川大輔 チーム長、石川敦子 室長ならびに、原田寿郎 研究ディレクター、大村和香子 領域長をはじめとする職場の方々に、改めて感謝を申し上げます。

本研究で実施した大型実験の多くは、東京理科大学 火災科学研究拠点との共同利用研究により実現したものです。東京理科大学 松山賢 教授、秋元行雄 様、丘仁赫 様はじめ、東京理科大学の関係者の皆様に深く感謝を申し上げます。また、試験体製作に尽力いただいた協同組合遠野グルーラム、実験補助を引き受けて頂いた三生技研株式会社の皆様に感謝申し上げます。


















鈴木健太郎氏はじめ、実験実施に協力し、常に違った切り口の意見を提供して頂いた長谷見雄二研究室の大学院生、卒論生に感謝申し上げます。


















令和 2 年 高瀬 棕


















資料編


















(1)	4.2.2【実験Ⅰ】実験経過	資料編-2
(2)	4.2.2【実験Ⅰ】計測データ	資料編-5
(3)	4.3.1【実験Ⅱ,Ⅲ】実験装置	資料編-10
(4)	4.3.2【実験Ⅱ】試験体製作状況	資料編-13
(5)	4.3.2【実験Ⅲ】試験体製作状況	資料編-14
(6)	4.3.2【実験Ⅱ,Ⅲ】試験体図	資料編-16
(7)	4.3.4【実験Ⅱ】実験経過	資料編-21
(8)	4.3.4【実験Ⅲ】実験経過	資料編-25
(9)	4.3.4【実験Ⅲ】計測データ	資料編-29

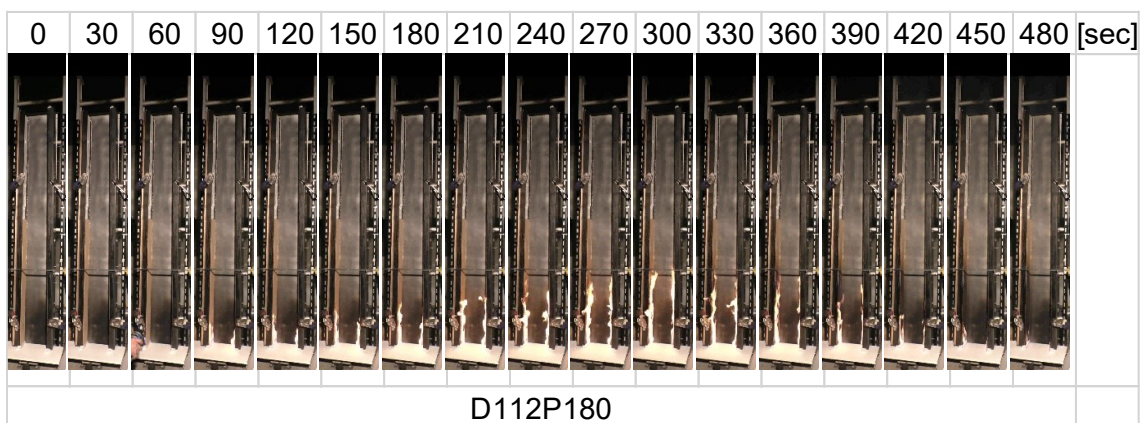
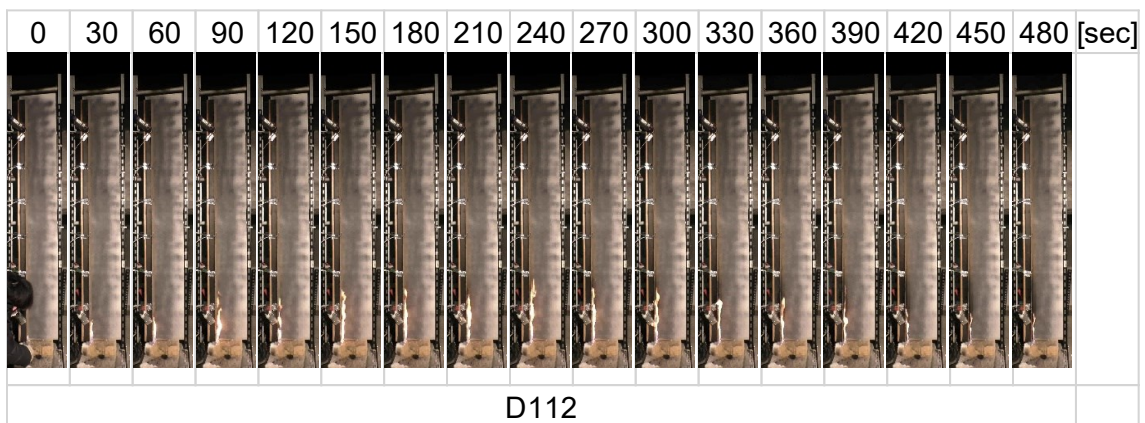
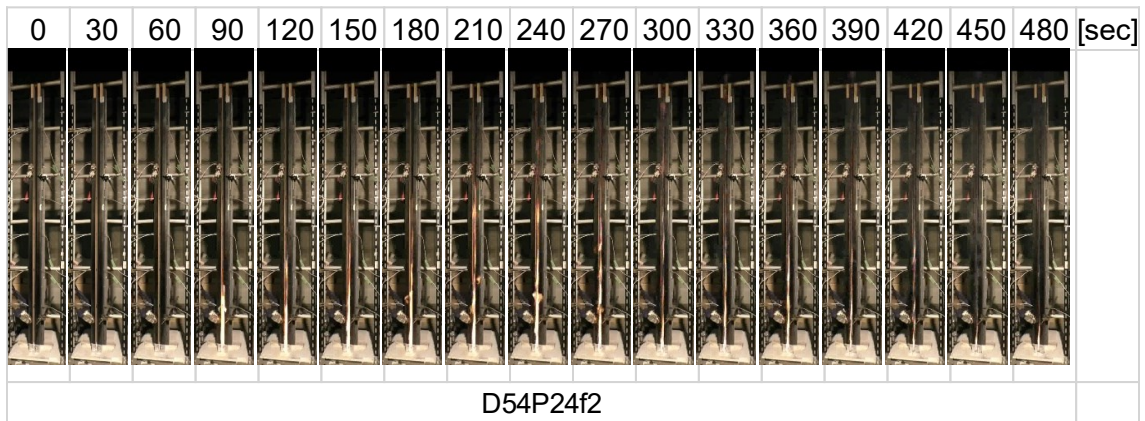
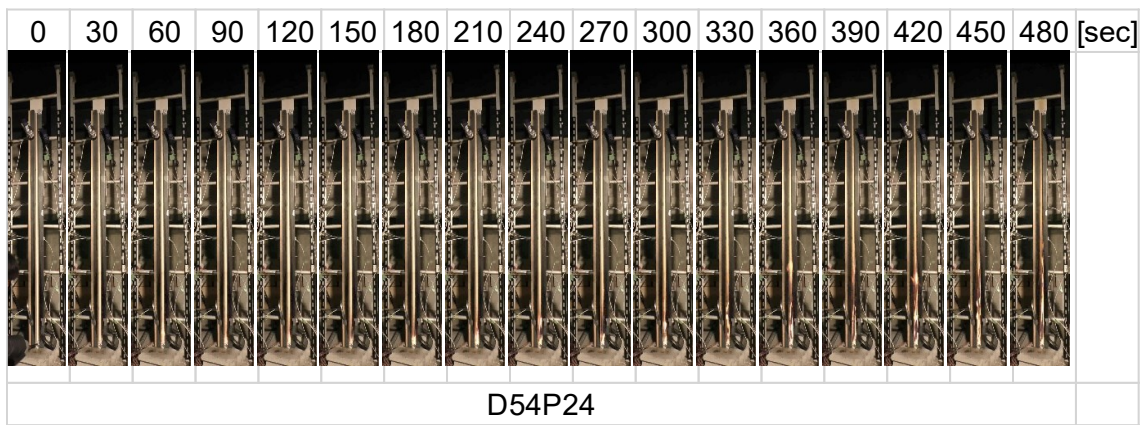
(1) 4.2.2 【実験 I】 実験経過

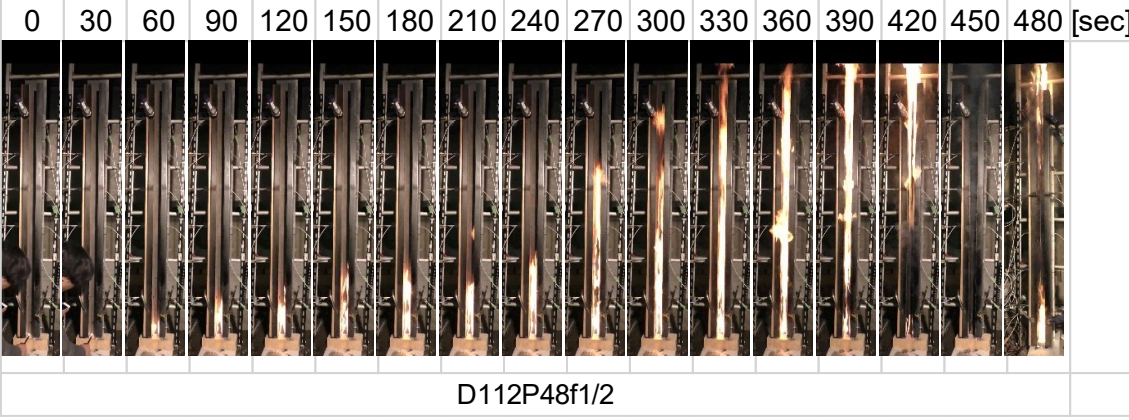
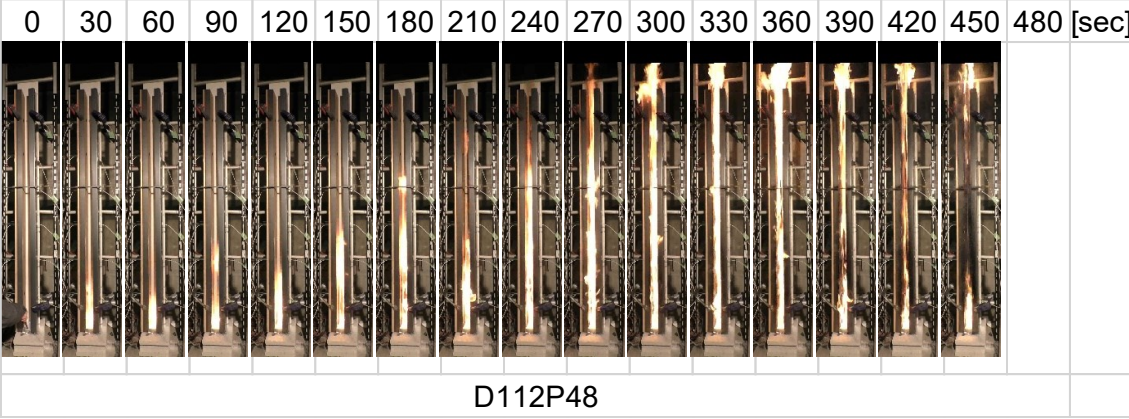
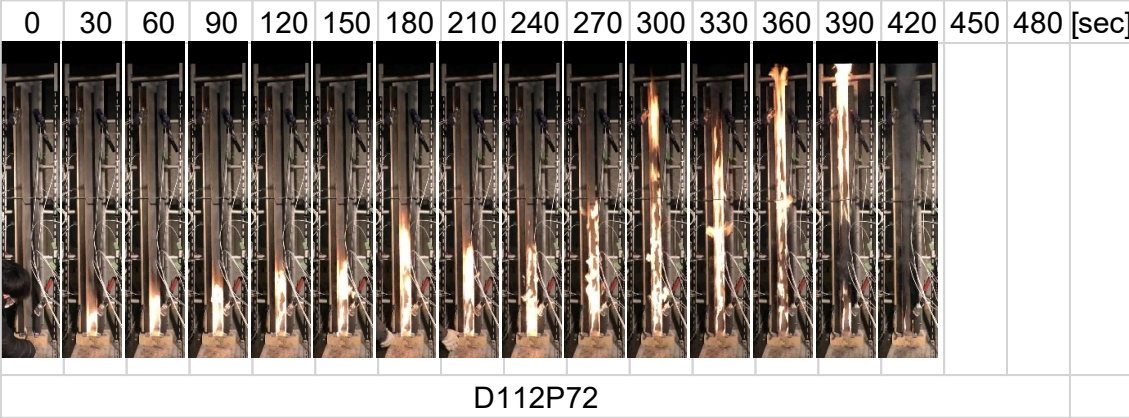
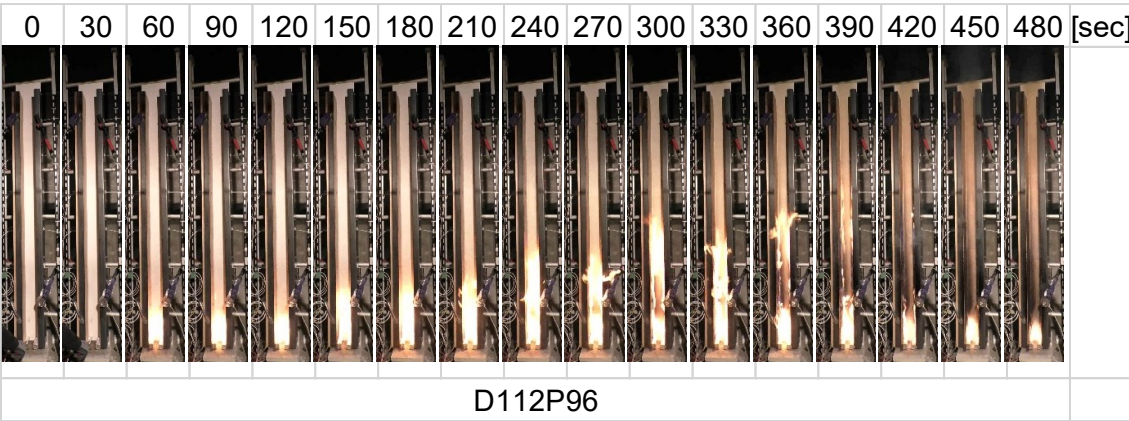
0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360	390	420	450	480	[sec]
																	
D54																	

0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360	390	420	450	480	[sec]
																	
D54P90																	

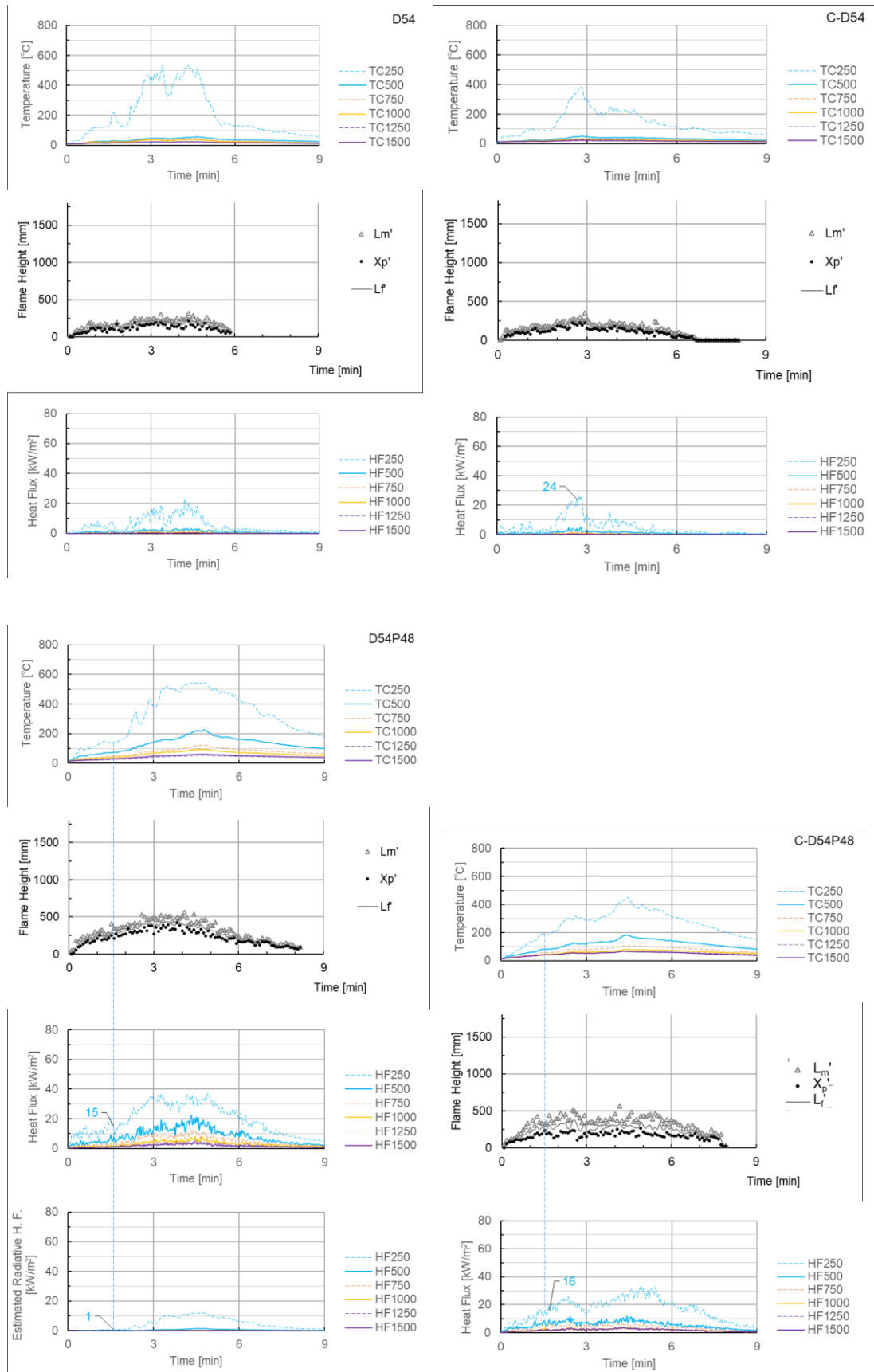
0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360	390	420	450	480	[sec]
																	
D54P48																	

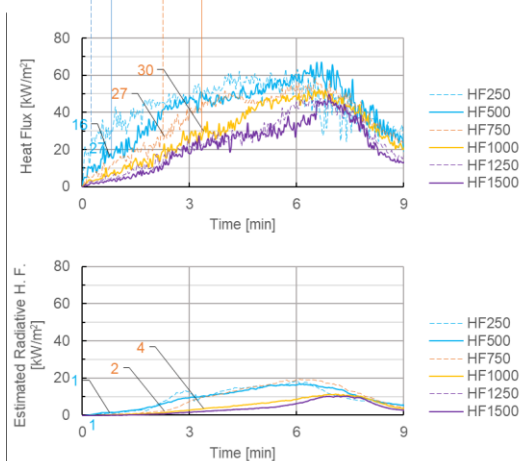
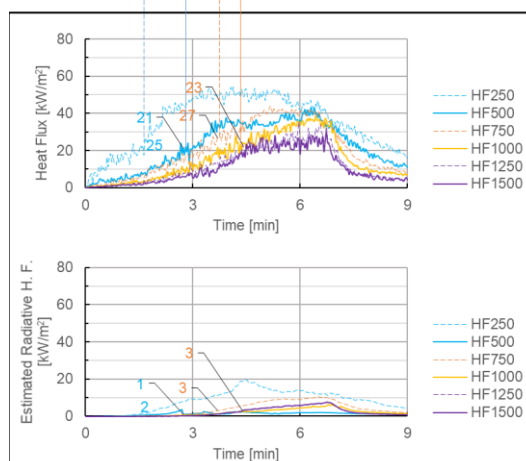
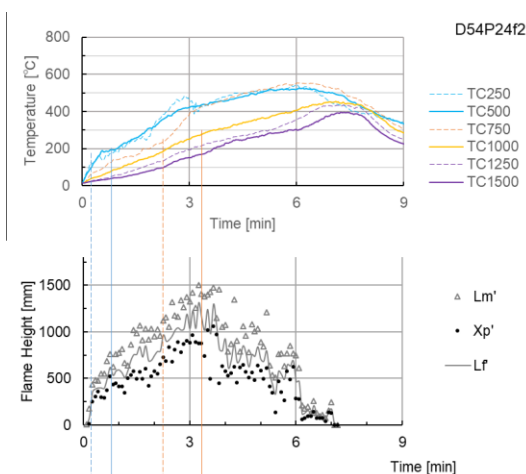
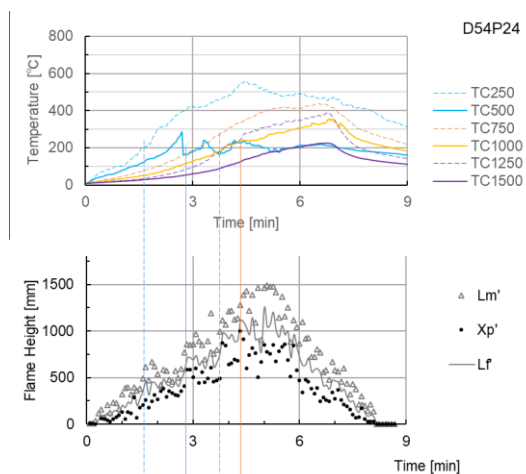
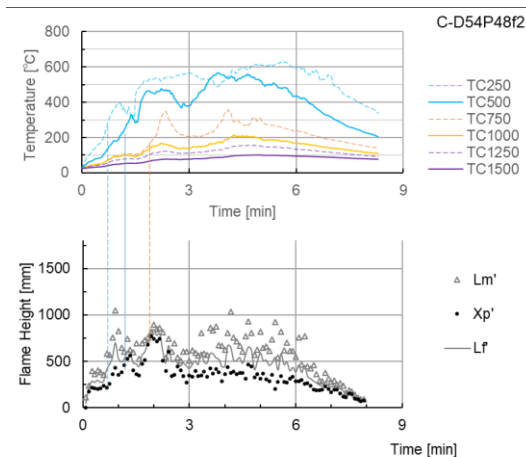
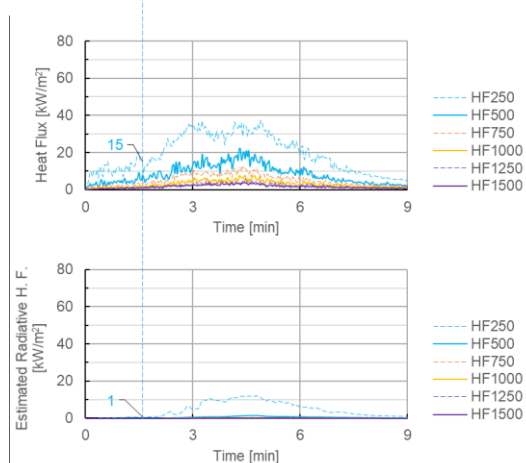
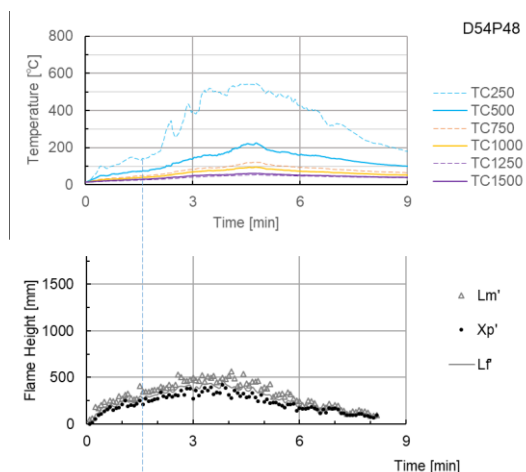
0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360	390	420	450	480	[sec]
																	
D54P48f2																	

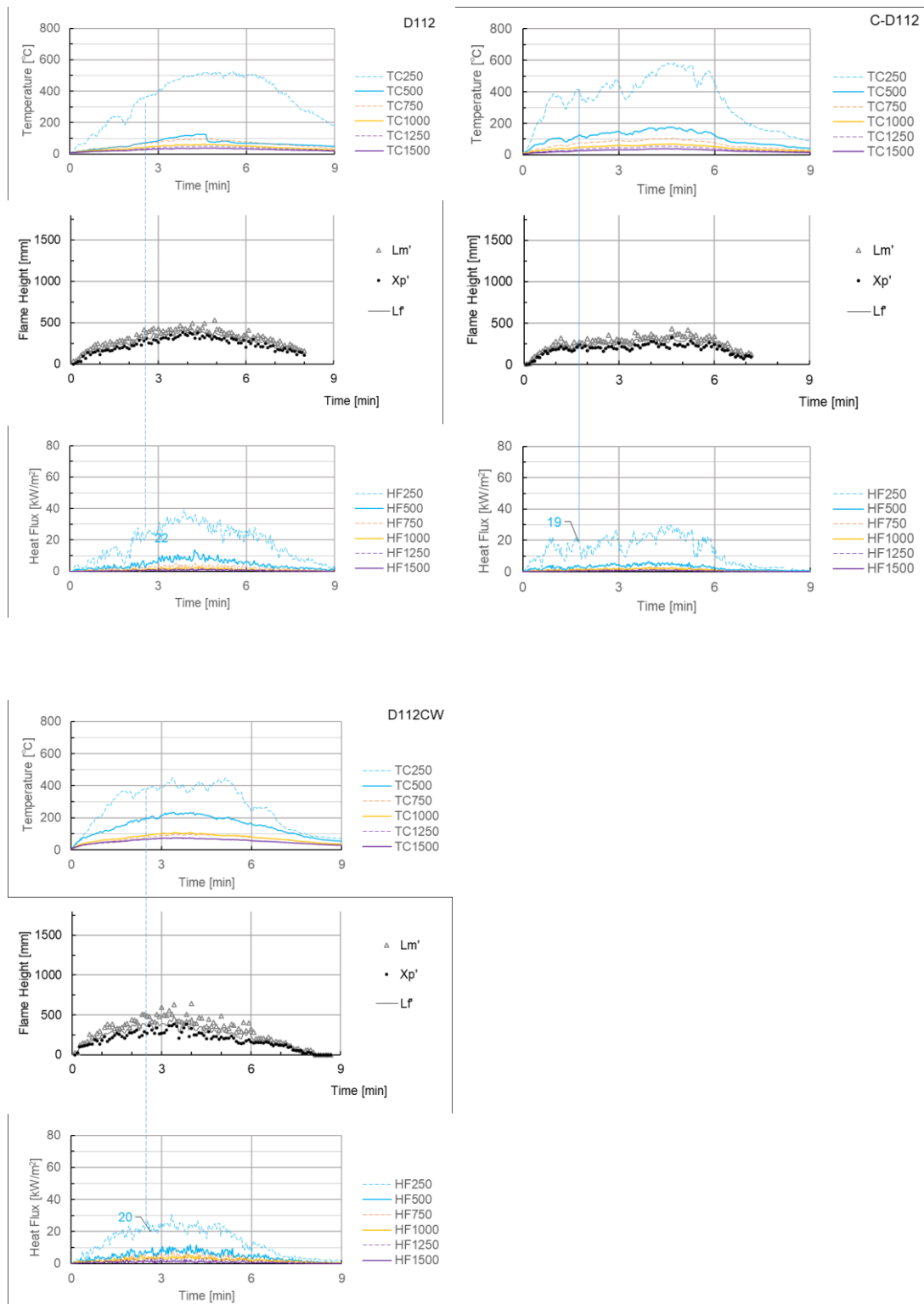


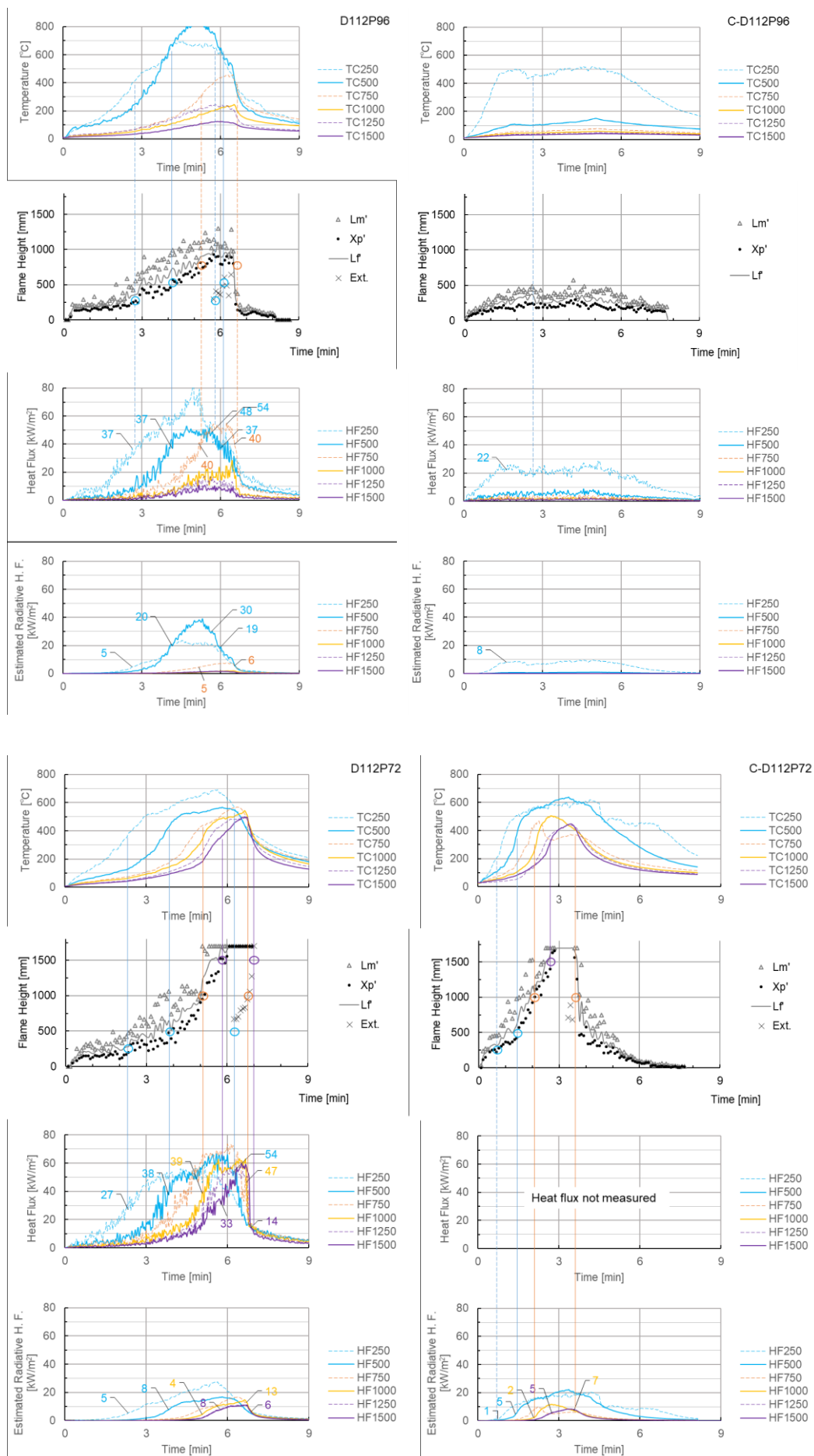


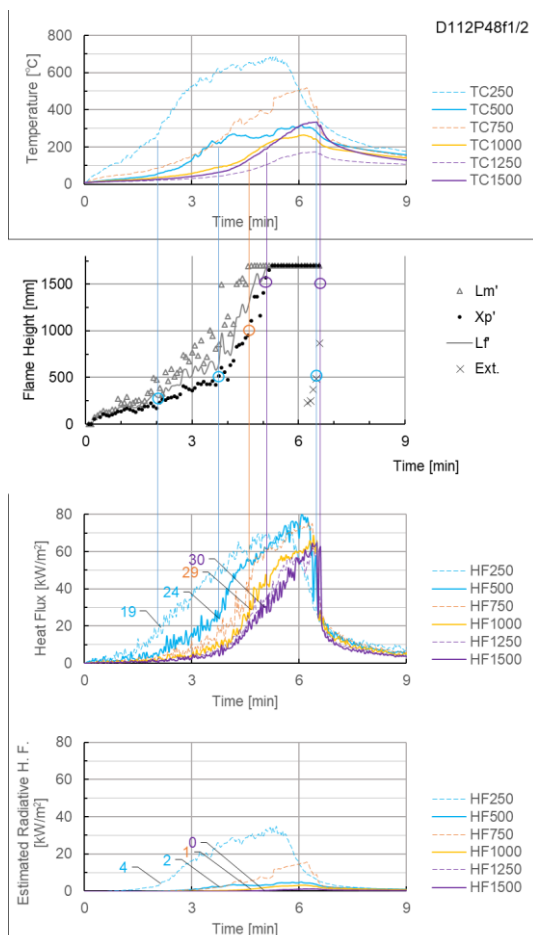
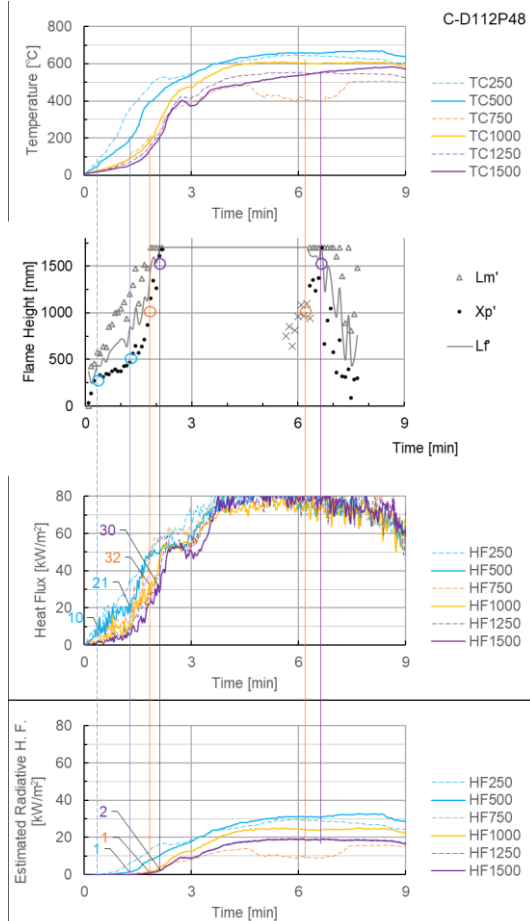
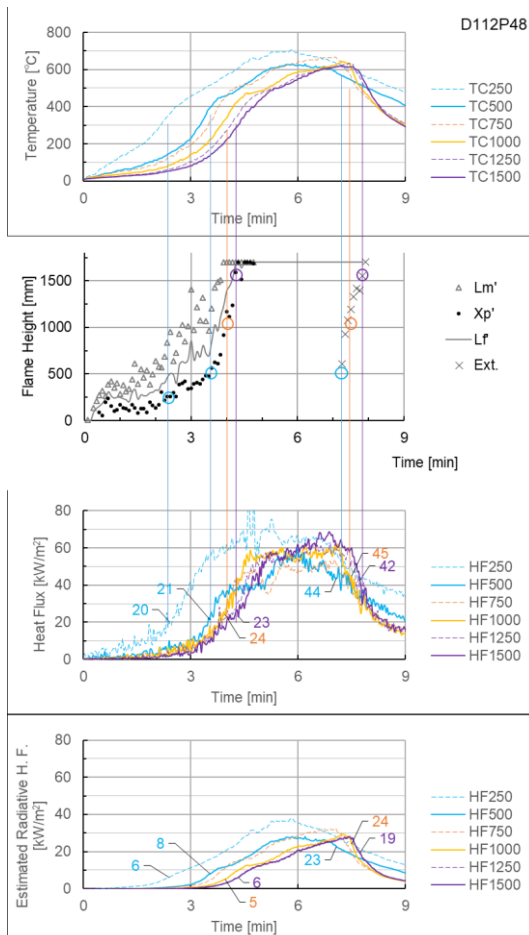
(2) 4.2.2【実験Ⅰ】計測データ



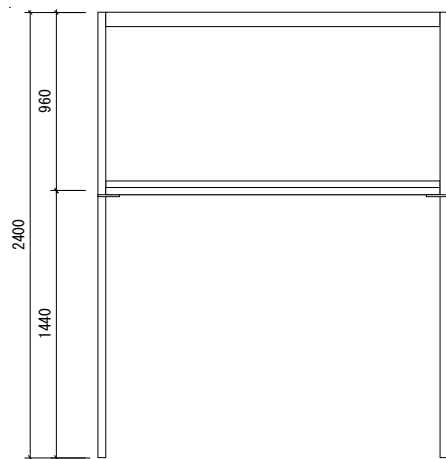




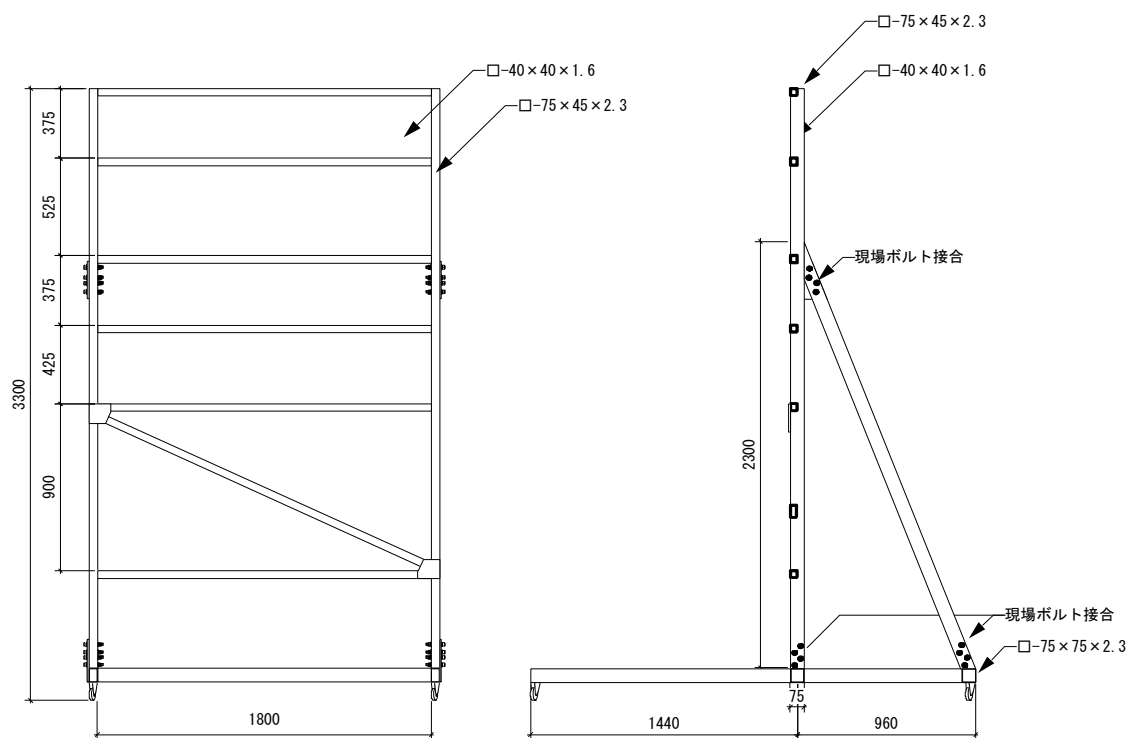




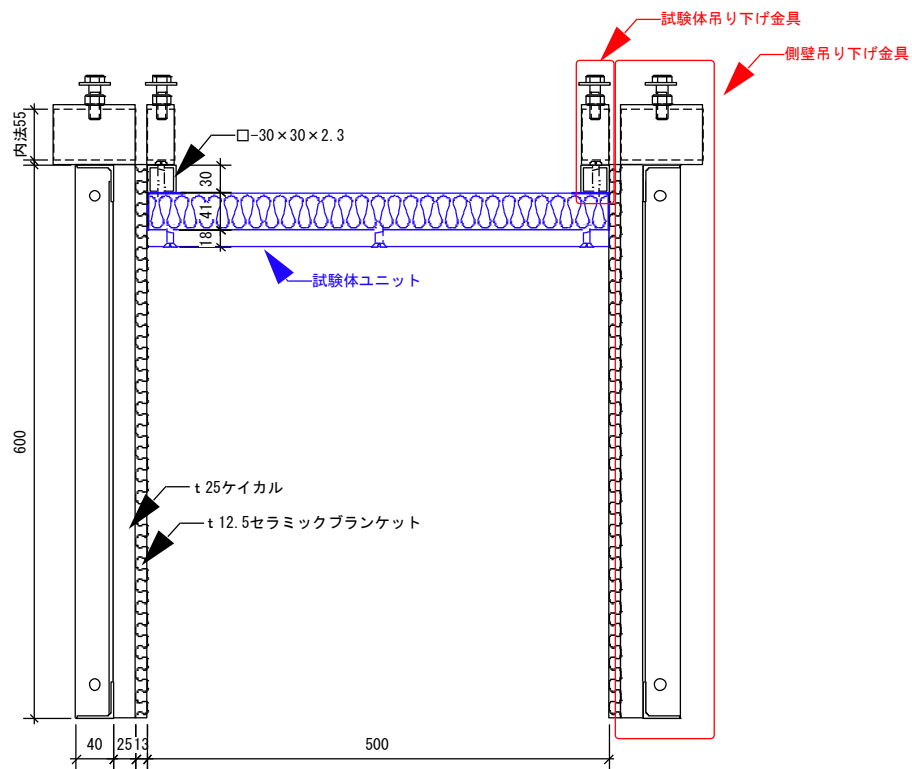
(3) 4.3.1 【実験Ⅱ,Ⅲ】実験装置



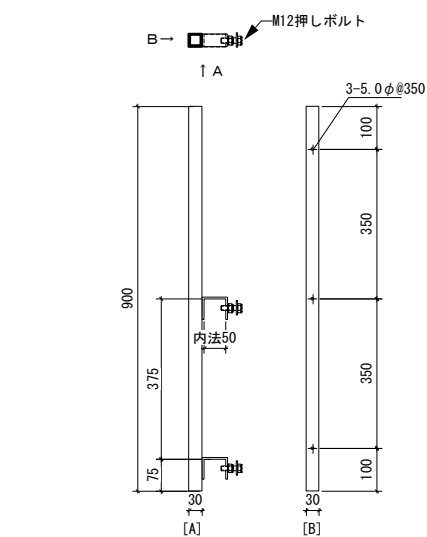
架台



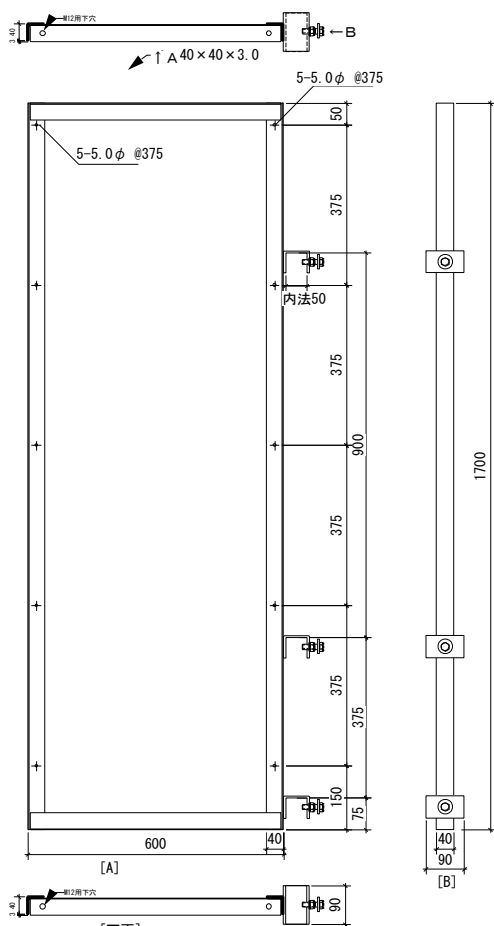
Main frames of the apparatus



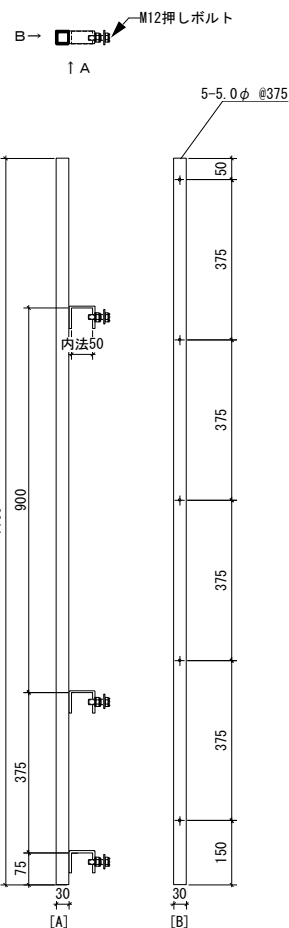
Horizontal section detail



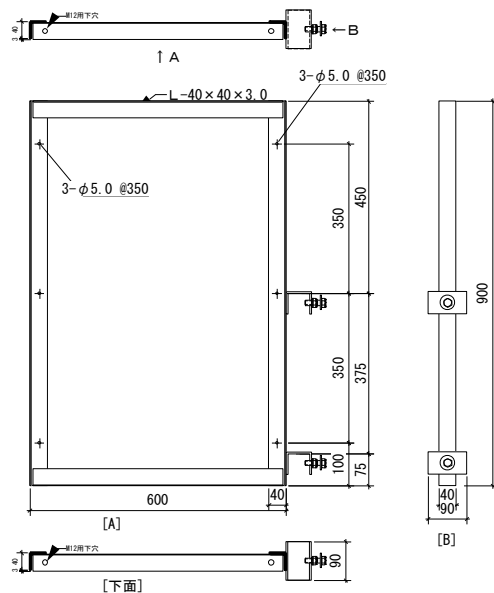
試験体吊り下げ金具 (L900)



側壁吊り下げ金具・右用 (L1800)
※左用：吊り下げ金具のみ逆側



試験体吊り下げ金具 (L1700)



側壁吊り下げ金具・右用 (L900)
※左用：吊り下げ金具のみ逆側

Details of secondary members

(4) 4.3.2 【実験Ⅱ】試験体製作状況



a



b



c



d



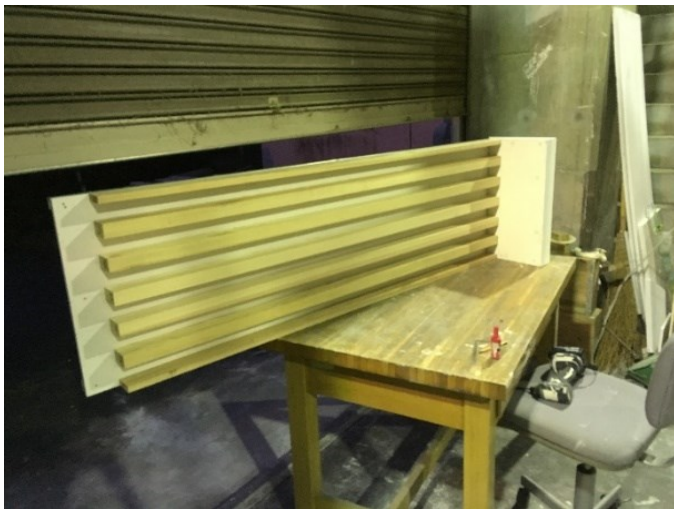
e



f

- a II-F
- b and c II-P48
- d II-P48-h
- e and f II-P48-fr

(5) 4.3.2【実験Ⅲ】試験体製作状況



a



b



c



d



e



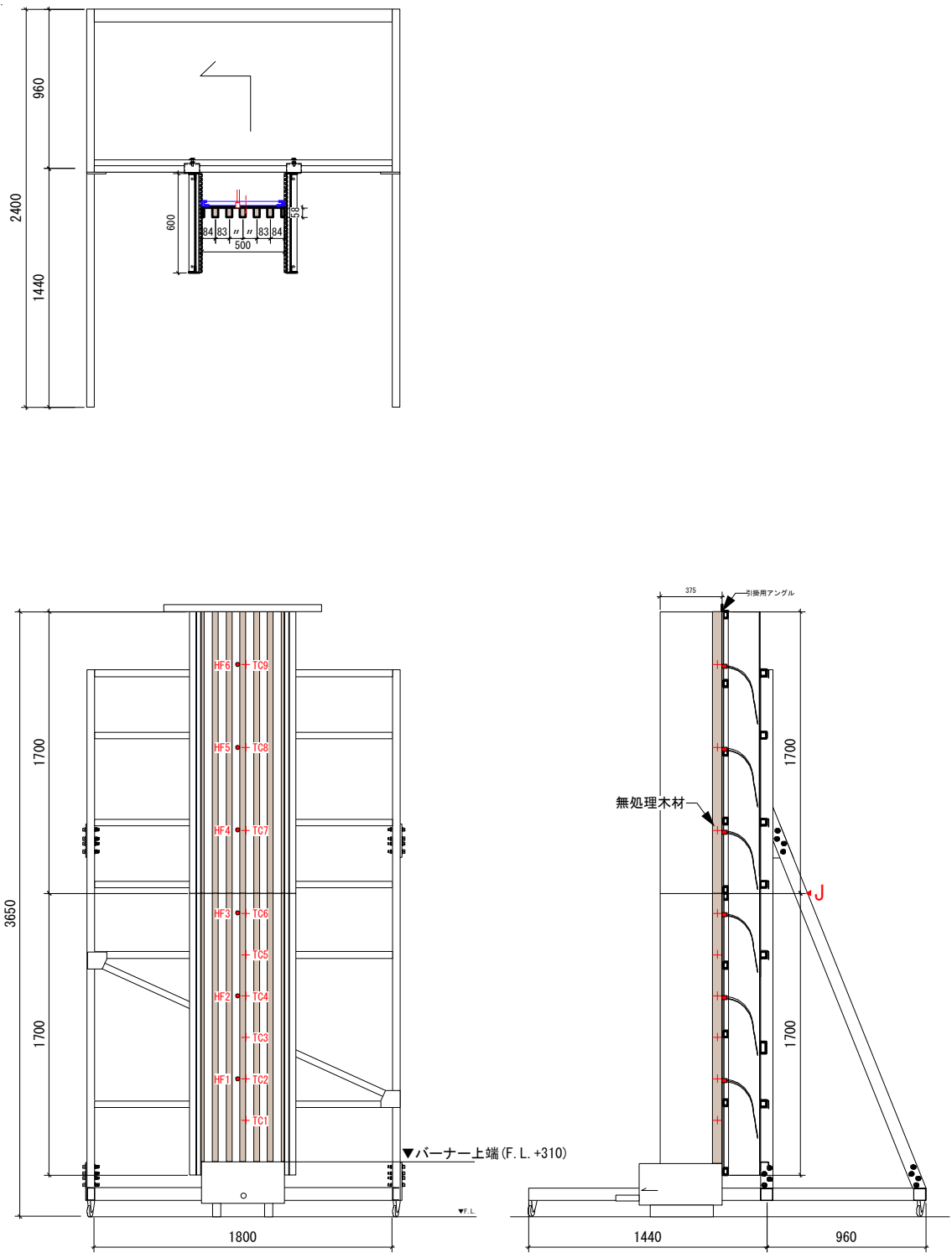
f



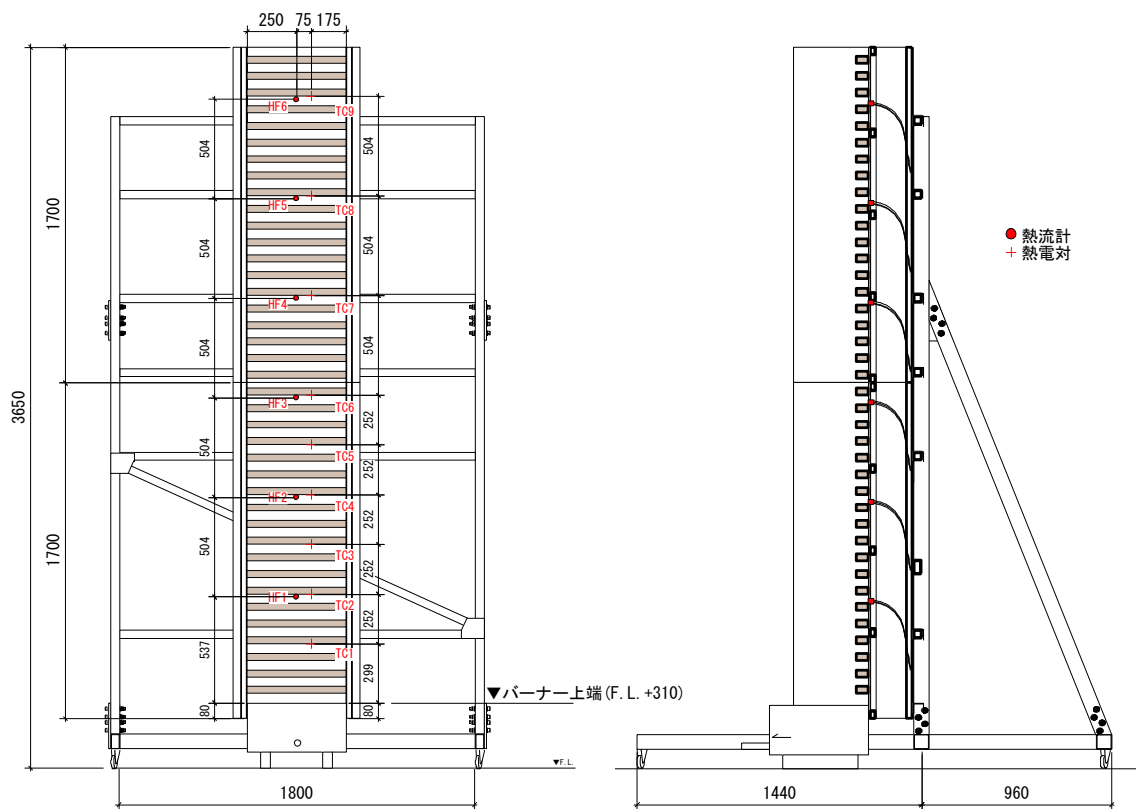
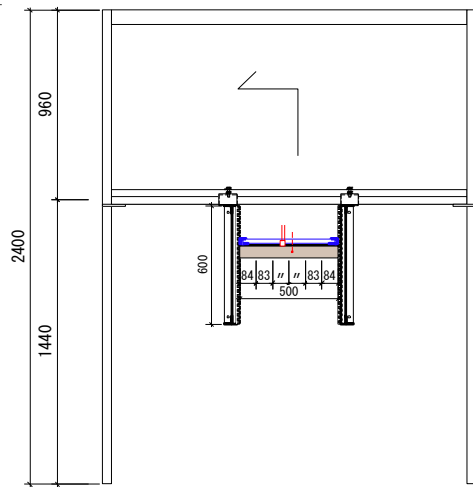
g

-a	III-a
-b to -f	III-b and c
-g	finished specimens.

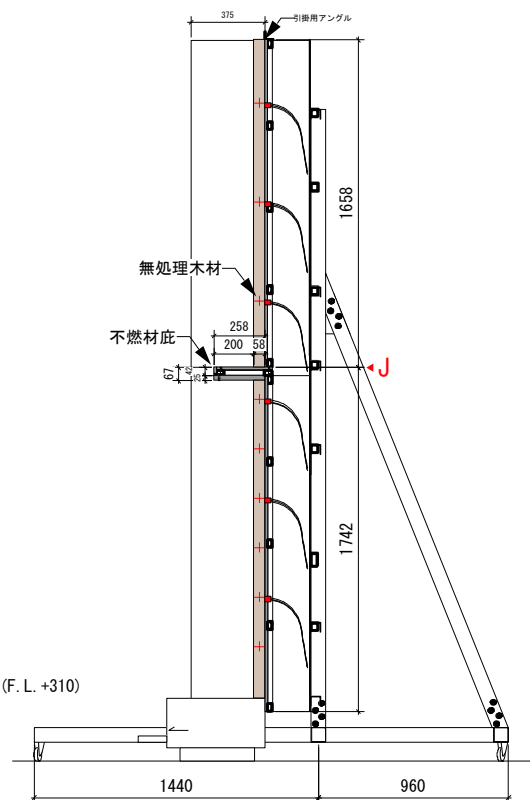
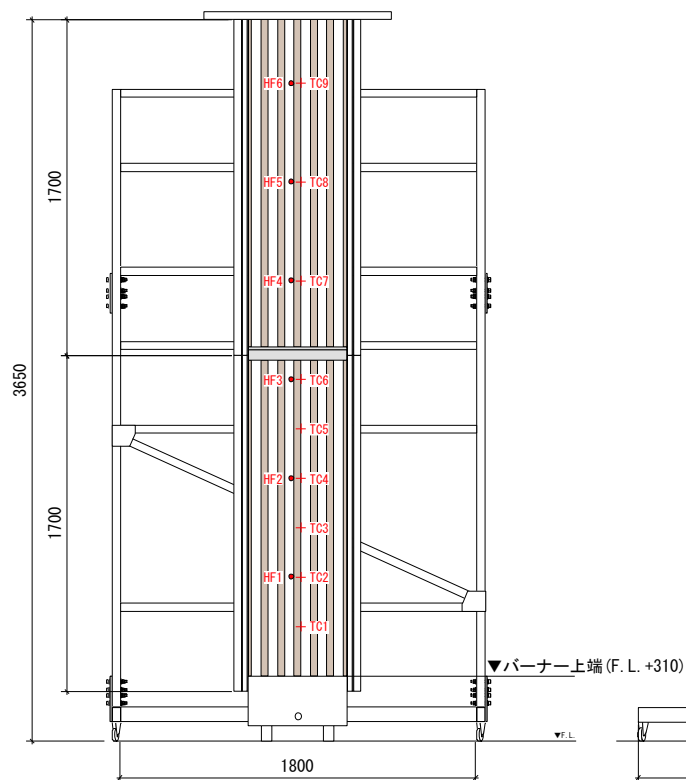
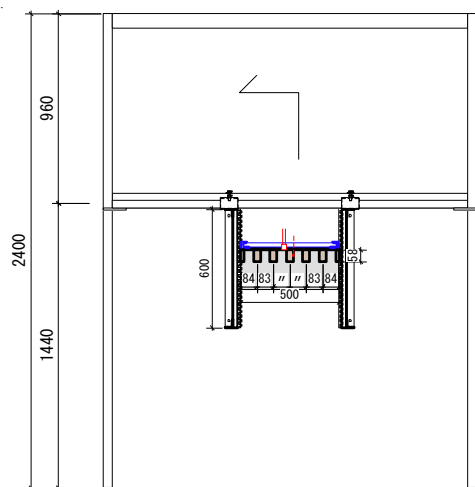
(6) 4.3.2【実験Ⅱ,Ⅲ】試験体図



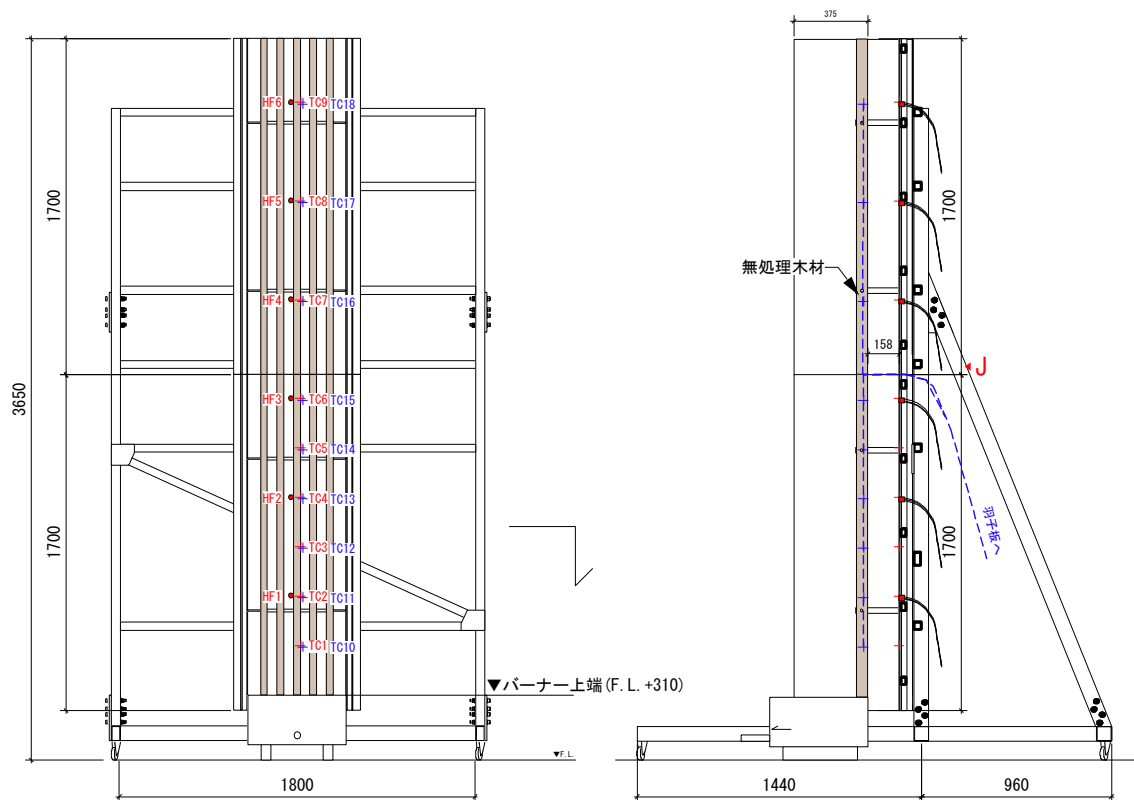
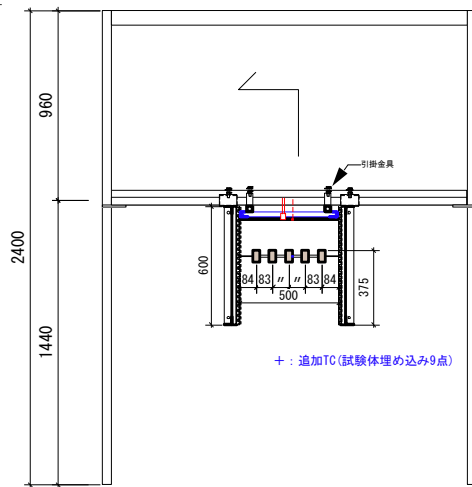
II-P48



II-P48h






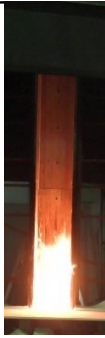














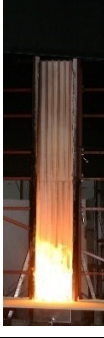













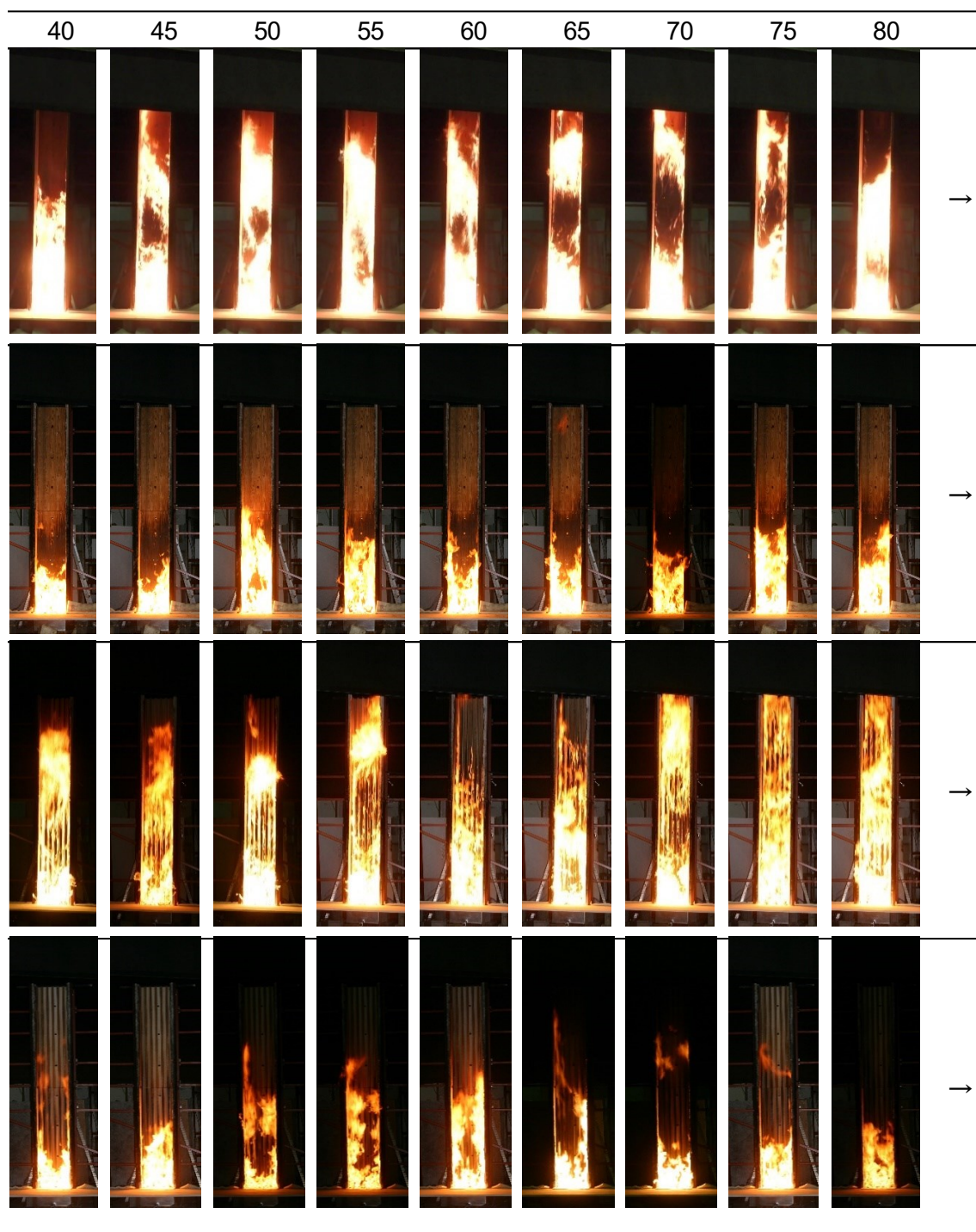
III-a

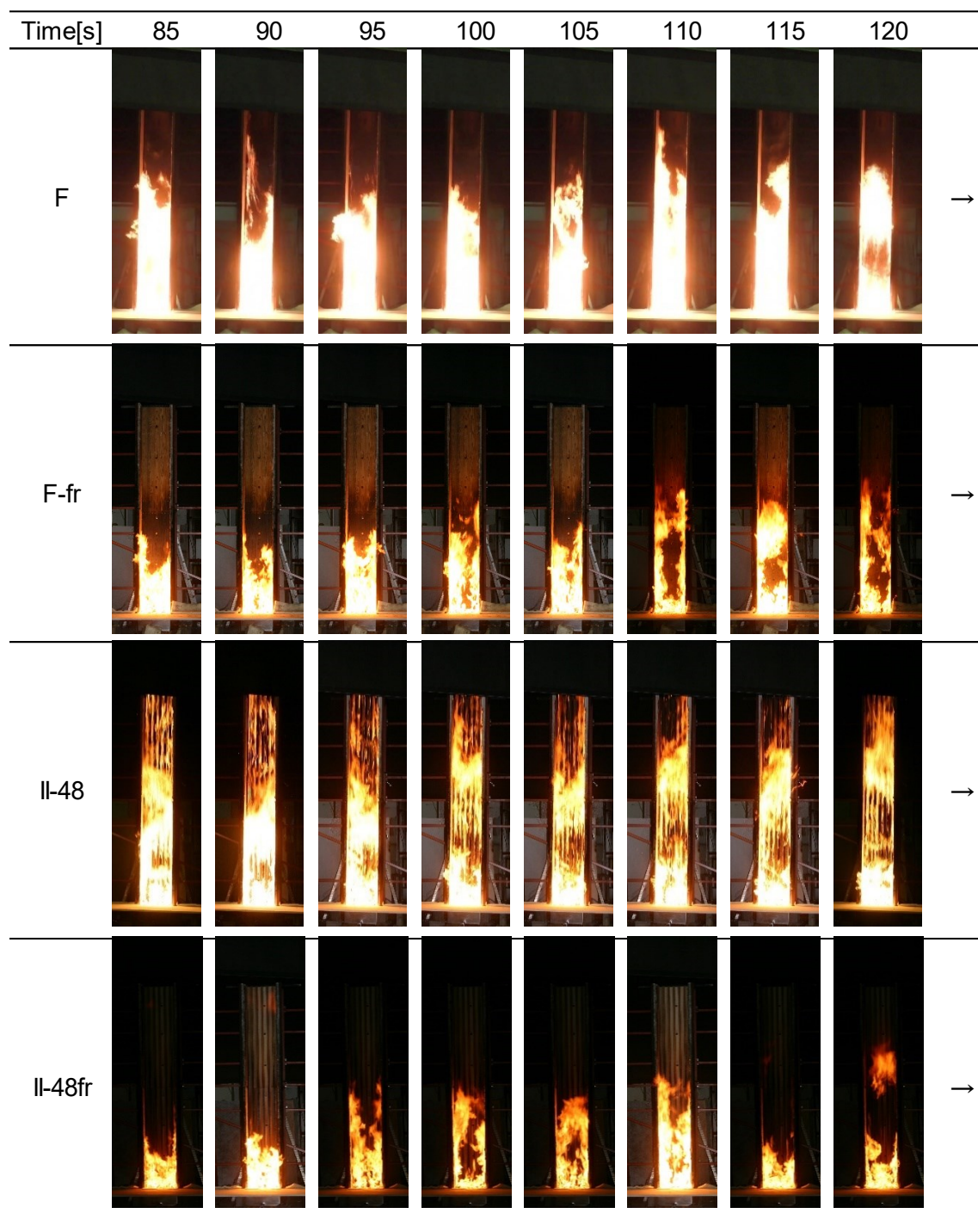


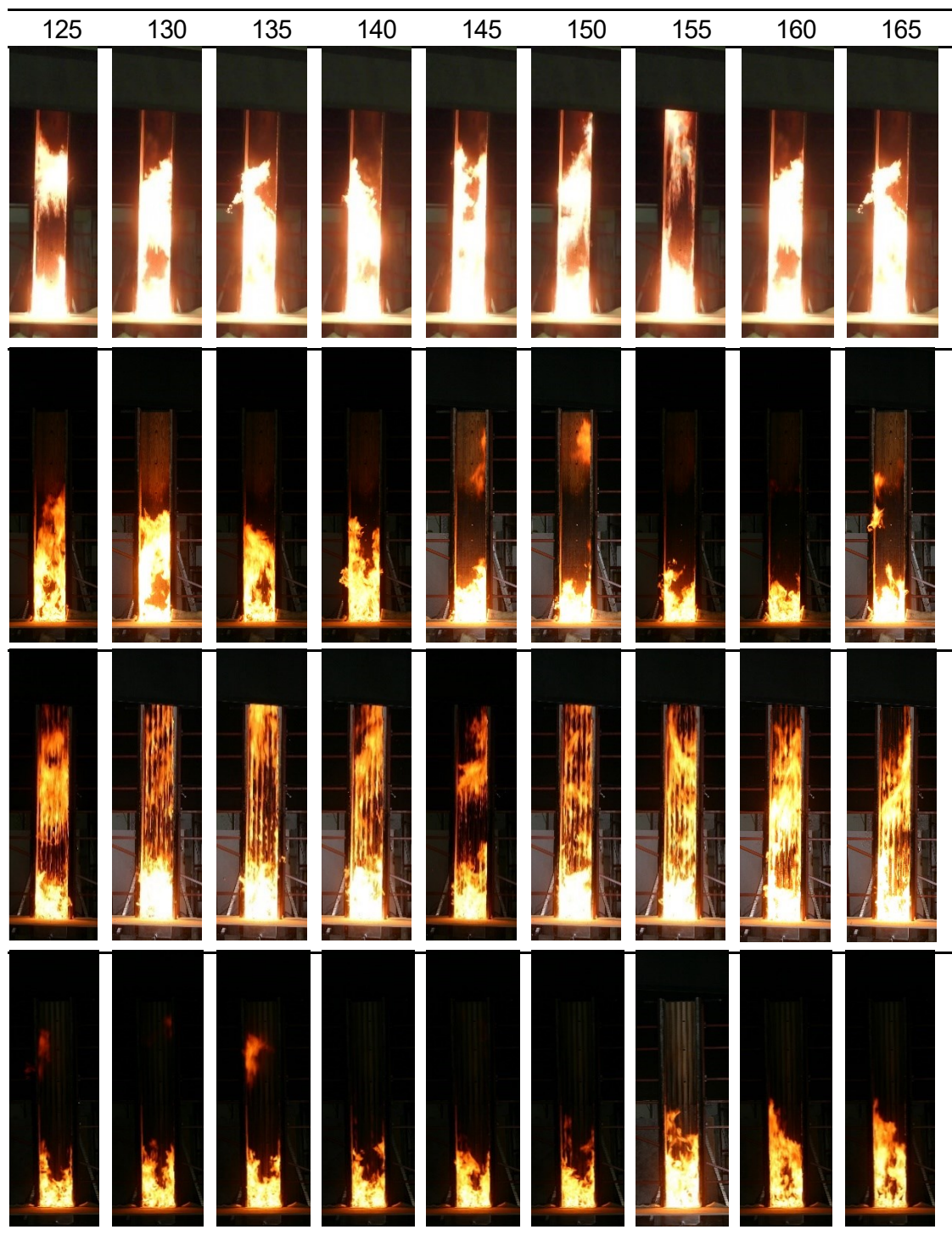
III-b

(7) 4.3.4 【実験Ⅱ】実験経過

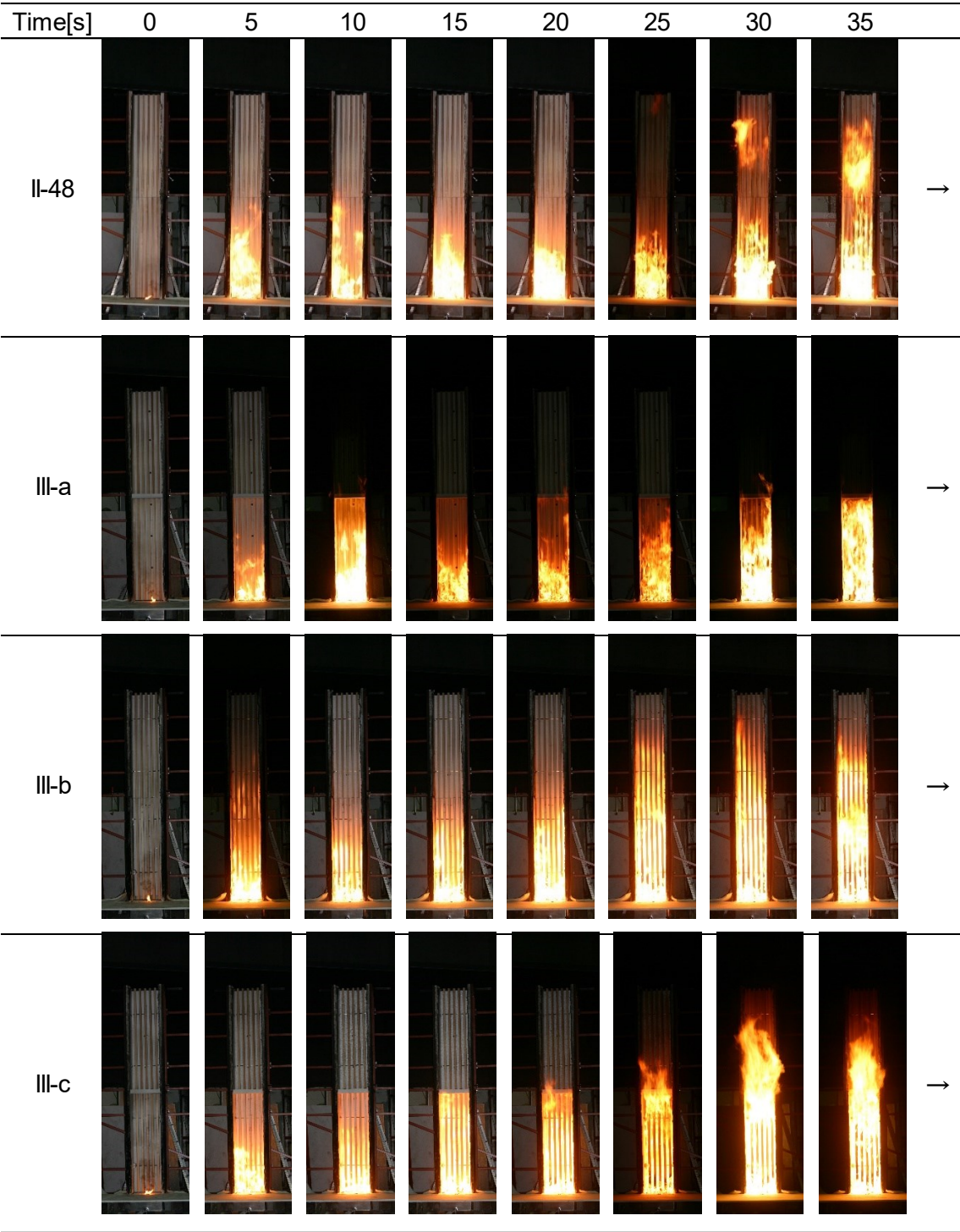
Time[s]	0	5	10	15	20	25	30	35	
F									→
F-fr									→
II-48									→
II-48fr									→

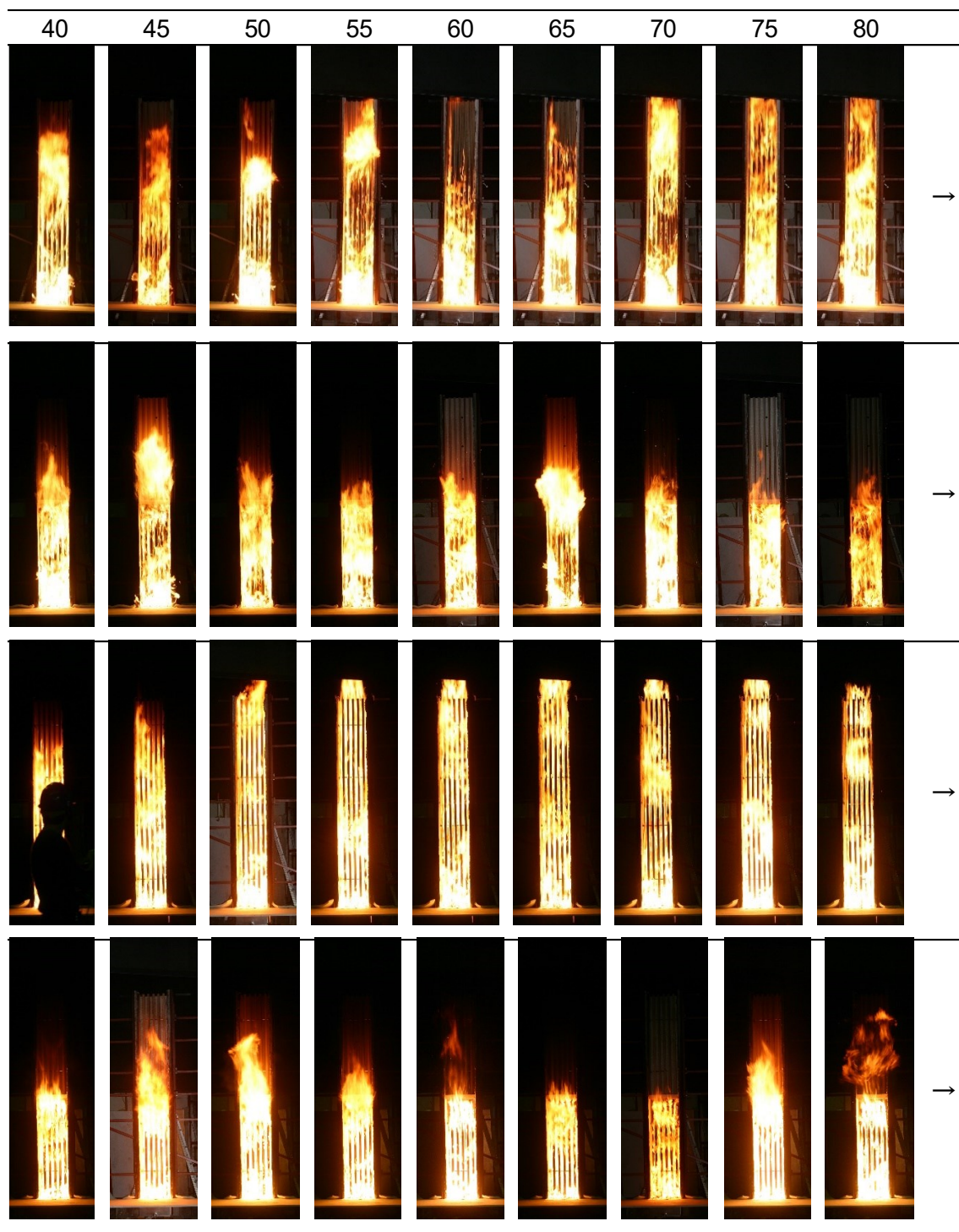


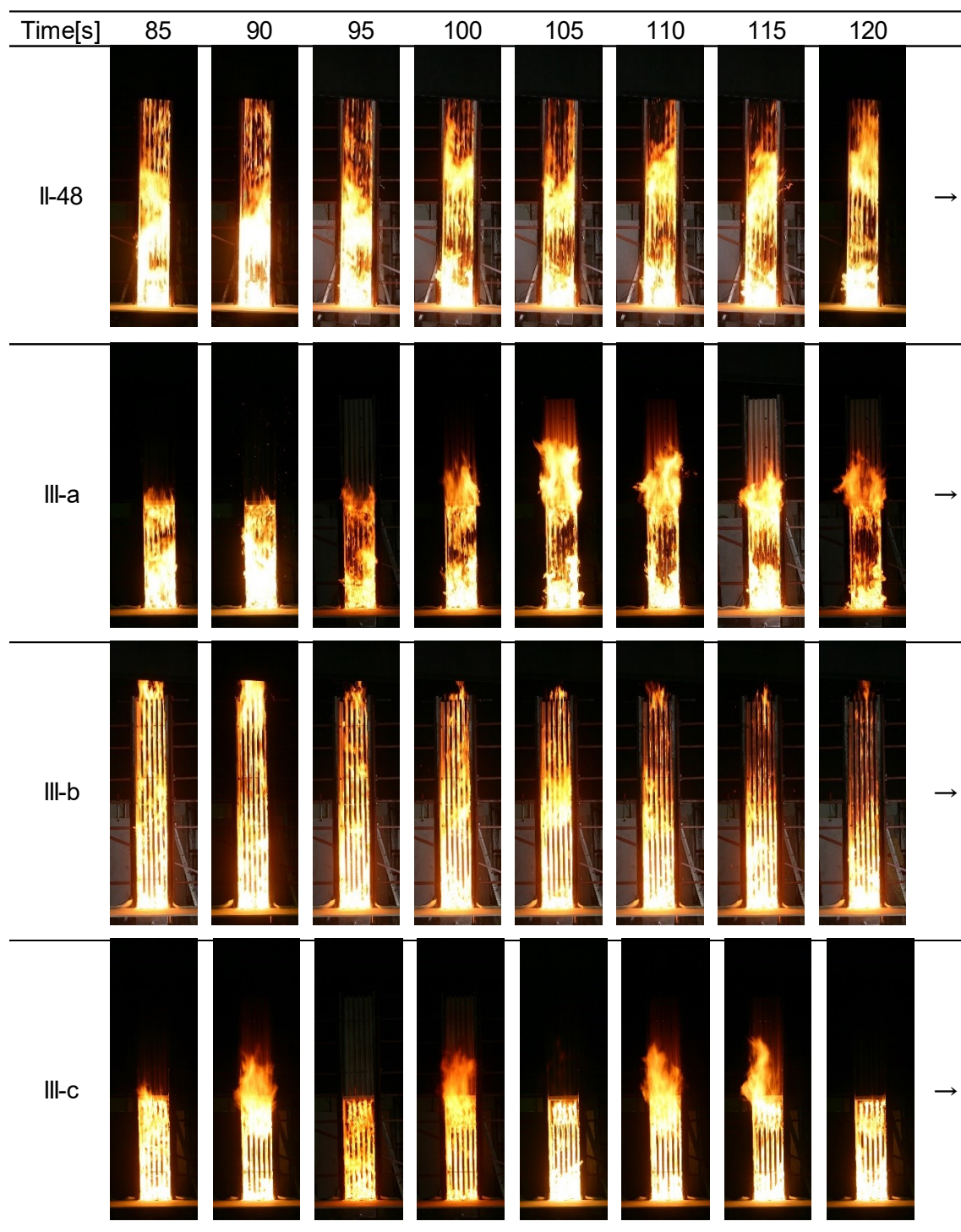


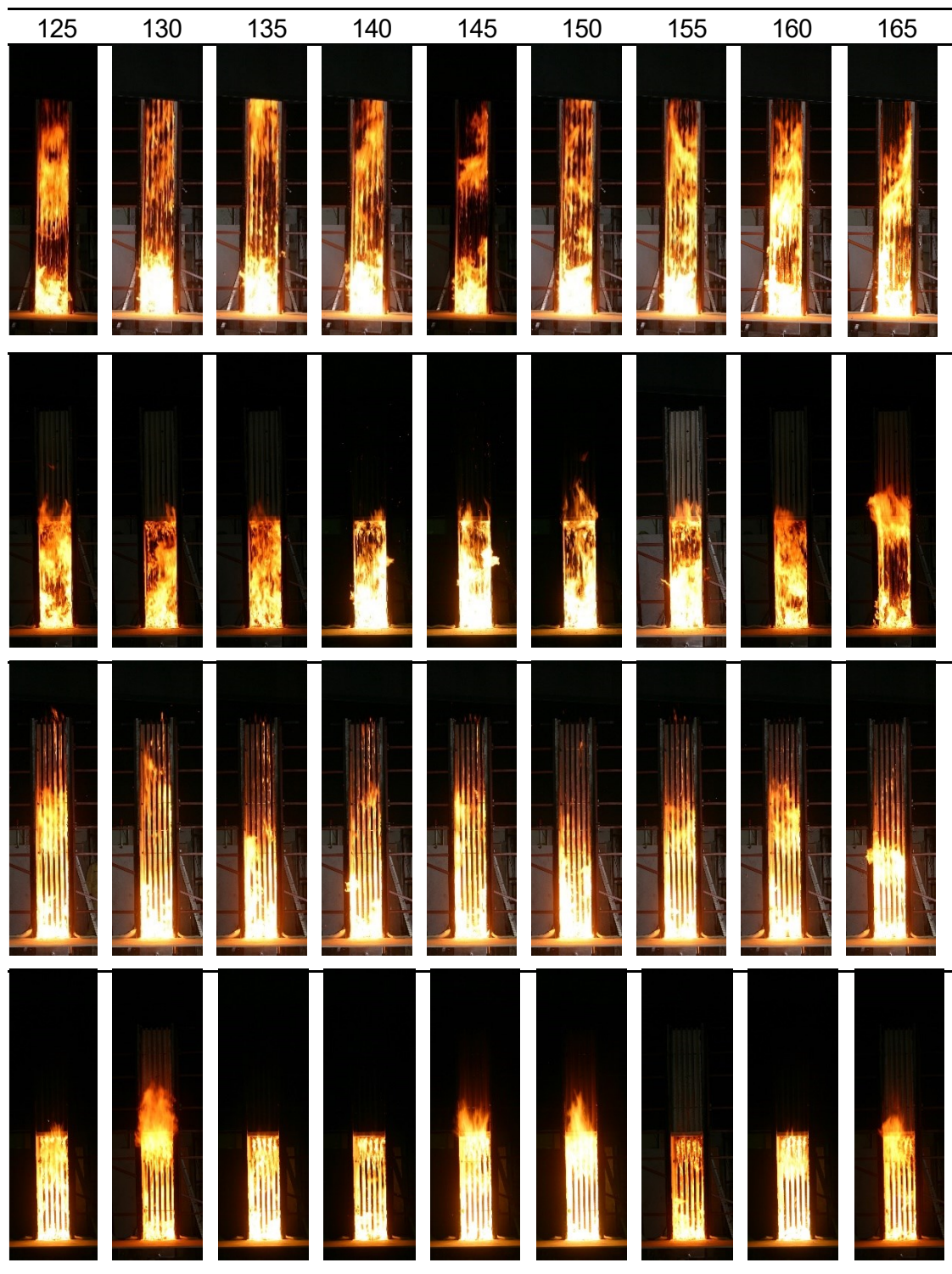


(8) 4.3.4 【実験Ⅲ】 実験経過

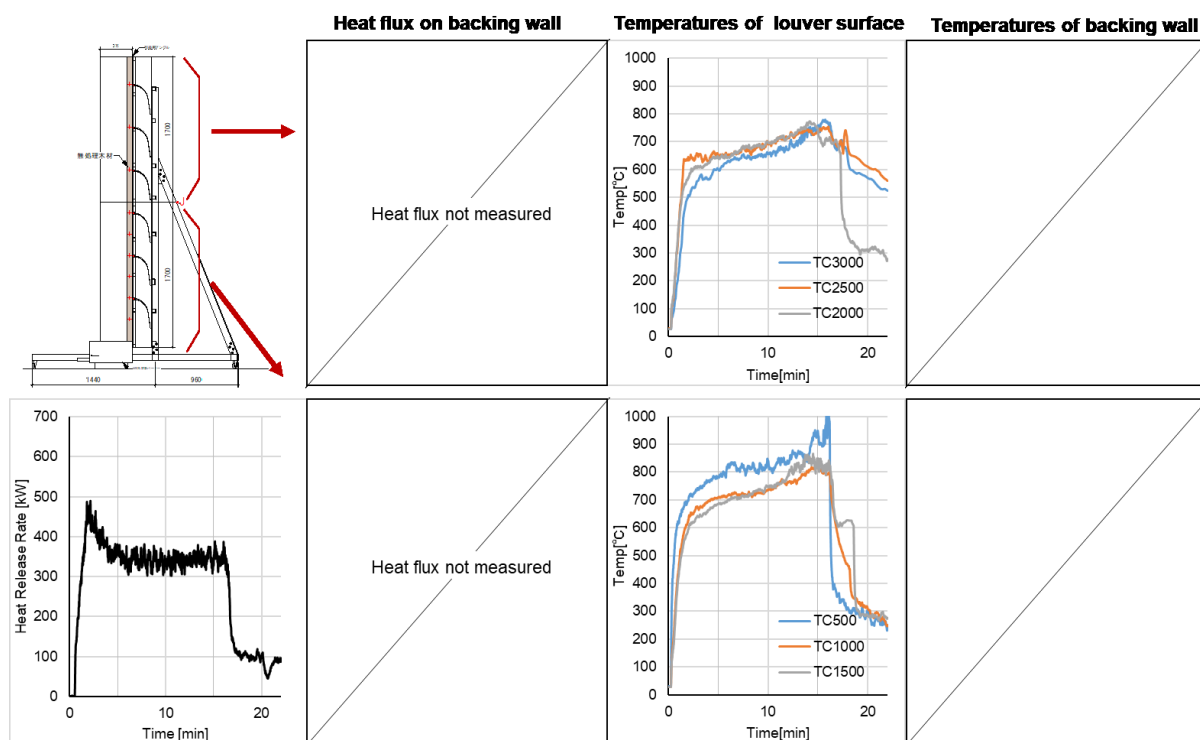




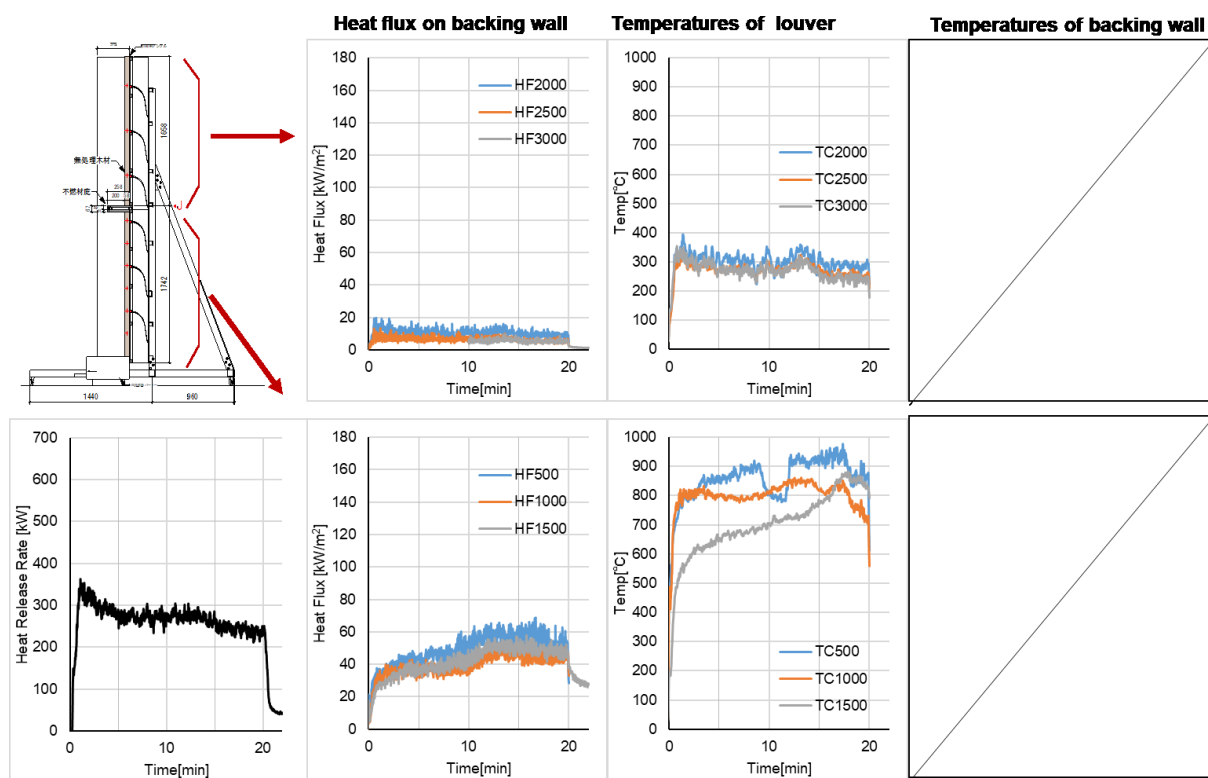




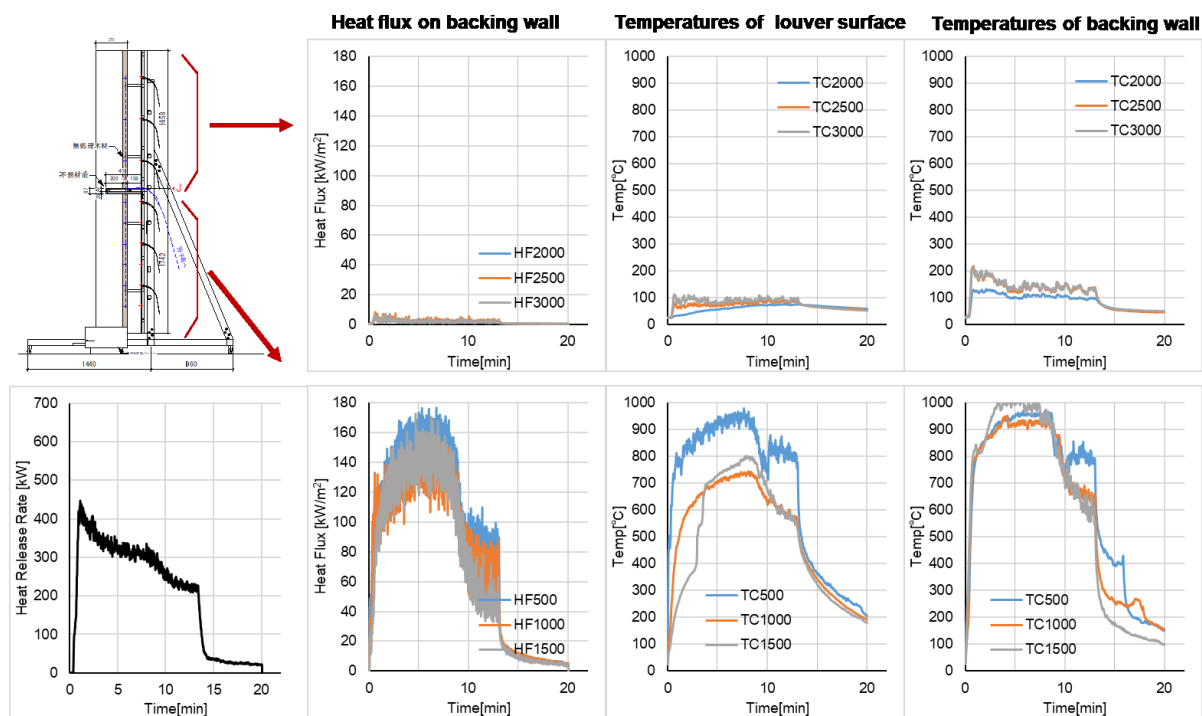
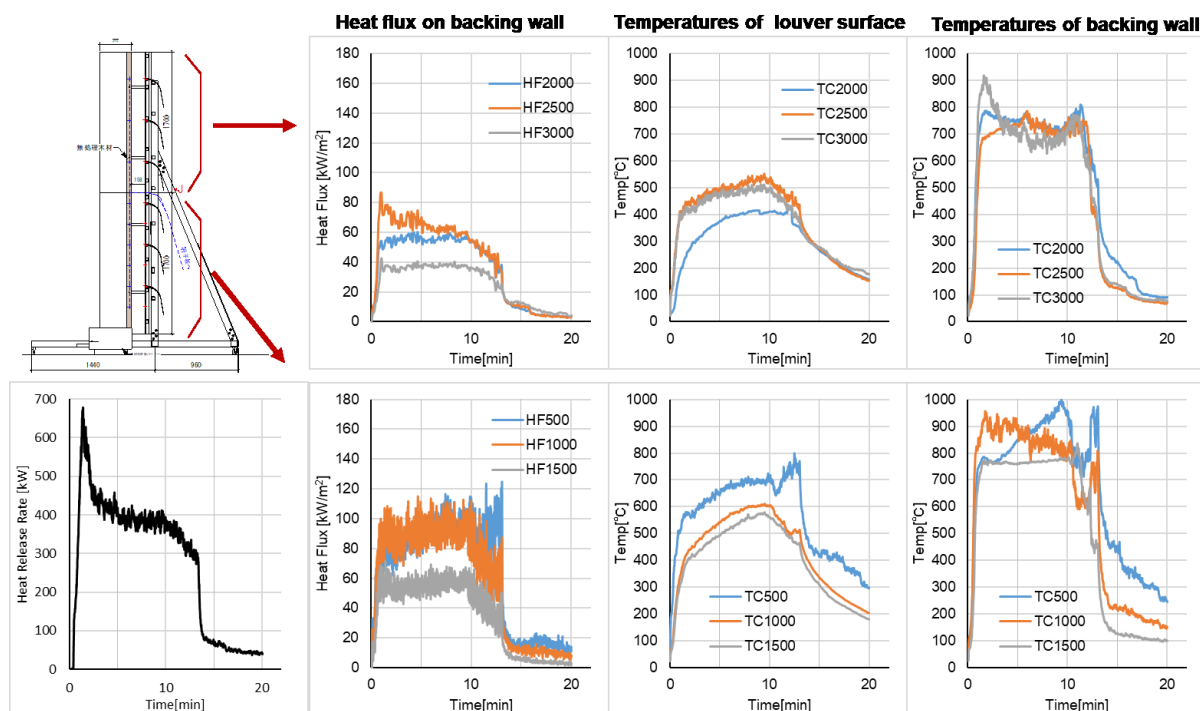
(9) 4.3.4 【実験Ⅲ】計測データ



II-P48



III-a



研 究 業 績 書

(2020年 2月 現在)

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
論文	<p>(○印は本博士論文の中核を担う主業績を表す。)</p> <p>○蛍光 X 線分析による難燃処理木材中の薬剤量マッピング（第一報）計測値と薬剤量の関係に分析条件が及ぼす影響、木材学会誌 65(4), 218-225、2019. 10、<u>高瀬椋</u>，松永浩史，上川大輔，安藤恵介，服部順昭</p> <p>○難燃処理木材の板厚方向の薬剤分布が燃焼性状に及ぼす影響、日本建築学会環境系論文集 84(762), 709-717、2019. 08、<u>高瀬椋</u>，上川大輔，長谷見雄二，松山賢</p> <p>・燃え止まり型木質耐火構造部材における要求耐火時間に依らない適正な燃えしろ層厚さ：燃え止まり層に難燃薬剤処理スギ集成材を用いた小型試験による検討、日本建築学会環境系論文集 84(761), 607-614、2019. 07、伯耆原智世，長谷見雄二，齊吉大河，<u>高瀬椋</u>，上川 大輔，安井昇，宮林 正幸</p> <p>・燃え止まり型木質耐火構造部材の工学的設計法に関する研究 小型試験に基づく燃えしろ・燃え止まり層の設計法の検討、日本建築学会環境系論文集 81 (730), 1065-1073、2016. 12、山口智世，上川大輔，長谷見雄二，安井昇，<u>高瀬椋</u>，宮林正幸，鈴木淳一</p>
講演 (発表)	<p>・木質ルーバーで仕上げた壁面の燃焼性および火災安全手法（その 1）羽板の要素実験による火炎伝播発生条件の把握、日本建築学会学術講演梗概集 253-256、2019. 09、<u>高瀬椋</u>，鈴木健太郎，上川大輔，松山賢，長谷見雄二</p> <p>・難燃処理・塗装木材における雨がかり時の吸湿と薬剤溶脱の関係、日本木材学会大会研究発表要旨集，69:N15-P-23、2019. 03、<u>高瀬椋</u>，石川敦子，上川大輔，松永浩史，原田寿郎</p> <p>・中高層 CLT 建築物に必要な 2 時間耐火部材等の開発 その 2 間仕切壁・外壁屋内側の被覆仕様検討、日本建築学会大会学術講演梗概集，3131、2018. 09、<u>高瀬椋</u>，松永浩史，原田寿郎，上川大輔，服部順昭，安藤恵介，木本勢也，坂部芳平</p> <p>・無処理ナラ材により被覆したスギ階段の小型耐火実験、日本建築学会関東支部梗概集 DVD 版(2017 年度)，3011、2018. 03、<u>高瀬椋</u>，原田寿郎，上川大輔，松永浩史</p> <p>・木質耐火構造部材の燃え止まり性能担保に関する研究：難燃薬剤の実態的分布の把握と小型加熱実験、日本建築学会大会学術講演梗概集，277-278、2017. 08、<u>高瀬椋</u>，上川大輔，長谷見雄二，安井昇，宮林正幸</p> <p>・燃え止まり型木質耐火構造部材の工学的設計法に関する研究 その 3 自消性に対する加熱時間の影響の検討、日本建築学会大会学術講演梗概集，3-4、2016. 08、<u>高瀬椋</u>，上川大輔，長谷見雄二，安井昇，宮林正幸</p>

研究業績書

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
講演 (連名)	<ul style="list-style-type: none"> 燃え止まり型木質耐火構造部材の工学的設計法に関する研究：その1 木材の自消条件から見た燃えしろ・燃え止まり層の最適設計の検討、日本建築学会大会学術講演梗概集、139-142、2015.09、<u>高瀬椋</u>、山口智世、上川大輔、長谷見雄二、安井昇、宮林正幸 燃え止まり型スギ耐火部材の適正設計に関する基礎研究：赤熱燃焼の定性的な予測とモデル化手法に関する検討、日本建築学会関東支部研究報告集(85)、673-676、2015-03、<u>高瀬椋</u>、山口智世、安井昇、長谷見雄二、上川大輔、宮林正幸 木質ルーバーで仕上げた壁面の燃焼性および火災安全手法（その2）フルスケールの木質ルーバー壁面への火災初期加熱による燃焼性状の実験的把握、日本建築学会学術講演梗概集 253-256、2019.09、鈴木健太郎、<u>高瀬椋</u>、上川大輔、松山賢、長谷見雄二 火災加熱を受ける小型スギ試験体内部の含水率の動的測定に関する研究、日本建築学会学術講演梗概集(防火)、185-186、2019.09、並木淳、長谷見雄二、渡辺秀太、鈴木達朗、<u>高瀬椋</u>、加來千紘 2 時間耐火性能を有する燃え止まり型木質耐火構造部材に関する研究その4 梁部材の隅角部を模した小型実験による全断面実験の再現、日本建築学会学術講演梗概集(防火)、203-204、2019.09、青山源、齊吉大河、伯耆原智世、長谷見雄二、上川大輔、<u>高瀬椋</u> 耐火集成材（難燃処理木材被覆型）と無機被覆型 CLT 床 との取合い部の火災安全性の検証、日本建築学会学術講演梗概集(防火)、215-216、2019.09、上川大輔、松永浩史、原田寿郎、<u>高瀬椋</u>、服部順昭、安藤恵介 木質ルーバー壁面の燃焼性状及び防火的手法に関する実験的研究、日本建築学会関東支部発表梗概集、3013、2019.03、鈴木健太郎、<u>高瀬椋</u>、上川大輔、松山賢、長谷見雄二、渡辺秀太 耐火集成材梁と無機被覆型 CLT 床の取合い部の火災安全性、日本木材学会大会研究発表要旨集、68:N15-P-28、2019.03、上川大輔、<u>高瀬椋</u>、松永浩史、原田寿郎、服部順昭、安藤恵介 総木質燃え止まり型2時間耐火構造梁の開発研究ー断面部位による加熱条件の不均一性を考慮した燃え止まり層の設計の検討ー、日本建築学会関東支部発表梗概集、3015、2019.03、青山源、齊吉大河、伯耆原智世、長谷見雄二、上川大輔、<u>高瀬椋</u> 小型試験体による火災加熱を受ける木材内部の温度・含水率履歴の計測、日本建築学会関東支部発表梗概集、3014、2019.03、並木淳、長谷見雄二、渡辺秀太、鈴木達朗、<u>高瀬椋</u>、安井昇

研究業績書

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
	<ul style="list-style-type: none"> ・2時間耐火性能を有する燃え止まり型木質耐火構造部材に関する研究 その1 適正な燃えしろ層厚さの把握、日本建築学会大会学術講演梗概集, 3127、2018.09、山口智世, 斉吉大河, 長谷見雄二, 上川大輔, <u>高瀬椋</u>, 安井昇, 遠藤智紀, 渡辺秀太 ・2時間耐火性能を有する燃え止まり型木質耐火構造部材に関する研究 その2 適正な燃えしろ層厚さに対応した燃え止まり層の必要性能の検討、日本建築学会大会学術講演梗概集, 3128、2018.09、斉吉大河, 山口智世, 長谷見雄二, 上川大輔, <u>高瀬椋</u>, 安井昇, 遠藤智紀, 渡辺秀太 ・中高層 CLT 建築物に必要な2時間耐火部材等の開発 その1 CLT 製造・利用技術開発における耐火性能付与の位置付け、日本建築学会大会学術講演梗概集, 3130、2018.09、松永浩史, 原田寿郎, 上川大輔, <u>高瀬椋</u>, 服部順昭, 安藤恵介, 木本勢也, 坂部芳平 ・中高層 CLT 建築物に必要な2時間耐火部材等の開発 その3 外壁屋外側の被覆仕様検討、日本建築学会大会学術講演梗概集, 3132、2018.09、木本勢也, 坂部芳平, 服部順昭, 安藤恵介, 松永浩史, 原田寿郎, 上川大輔, <u>高瀬椋</u> ・中高層 CLT 建築物に必要な2時間耐火部材等の開発 その4 間仕切壁・外壁の性能評価試験、日本建築学会大会学術講演梗概集, 3133、2018.09、上川大輔, 松永浩史, 原田寿郎, <u>高瀬椋</u>, 服部順昭, 安藤恵介, 木本勢也, 坂部芳平 ・難燃処理木材中の薬剤分布の偏りの発生要因について、日本木材保存協会年次大会研究発表論文集, 34:122-123、2018.05、上川大輔, <u>高瀬椋</u>, 松永浩史 ・CLT 構造物への耐火性能付与技術の開発ー(その1)2時間耐火の壁等の耐火被覆の検討ー、第68回日本木材学会大会研究発表要旨集, N15-P-23、2018.03、上川大輔, <u>高瀬椋</u>, 松永浩史, 原田寿郎, 服部順昭, 安藤恵介, 木本勢也, 坂部芳平 ・マイクロフィンガージョイントの加工エネルギー, 加工精度に及ぼす加工条件の影響、日本木材学会大会研究発表要旨集, 68:F15-P-04、2018.03、藤本清彦, 平松靖, 児嶋美穂, 小川敬多, 末定拓時, <u>高瀬椋</u> ・燃え止まり型木質耐火構造部材の工学的設計法に関する研究 : その2 実大部材への適用及び数値的設計手法の開発可能性の検証、日本建築学会大会学術講演梗概集, 109-110、2015.09、山口智世, 長谷見雄二, 安井昇, <u>高瀬椋</u>, 板垣直行